

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Milan Marković**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Crneković, dipl. ing.

Student:

Milan Marković

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija te navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Mladenu Crnekoviću što mi je pružio stručnu pomoć tijekom izrade završnog rada te svima koji su mi pomogli tijekom studija.

Milan Marković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MILAN MARKOVIĆ**

Mat. br.:0035168414

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **MAKETA SERVOSUSTAVA ZA POZICIONIRANJE**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **MOCK UP OF SERVOSYSTEM FOR POSITION CONTROL**

Opis zadatka:

Tehnički sustavi u velikoj su mjeri sastavljeni od uređaja za pozicioniranje. Za potrebe tumačenja principa automatske regulacije potrebno je projektirati maketu koja bi služila u nastavne svrhe. Pogon osigurati s DC motorom, a mjerenje položaja s dvokanalnim inkrementalnim davačem. Sustav mora imati mogućnost inicijalizacije nultog položaja. Maketom treba upravljati kontroler koji naredbe prima preko serijske komunikacije.

Potrebno je projektirati grafičko sučelje i osmisliti redoslijed eksperimenata koji će studentima jasno prikazati nastavne jedinice iz servosustava.

Tražena rješenja:

- dizajnirati mehanički dio makete te odabrati elemente energetskog i mjernog sustava,
- napisati program za kontroler koji neposredno upravlja maketom,
- dizajnirati grafičko sučelje za regulaciju položaja.

Zadatak zadan:

11. studenog 2013.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Mladen Crneković

Rok predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2014.

2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.

2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica



## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. Projektiranje makete.....	2
2.1. Zahtjevi regulacije .....	2
2.2. Eksperimentalni postav .....	4
2.2.1. Motor.....	5
2.2.2. Inkrementalni davač(enkoder).....	6
2.2.3. Razvojni sustav .....	6
2.2.4. Energetski sklop.....	7
2.3. Motor.....	8
2.4. Inkementalni davač(enkoder) .....	10
2.5. Mikrokontroler ATmega16 .....	11
2.5.1. Arhitektura.....	11
2.5.2. I\O portovi .....	12
2.5.3. Timeri .....	14
2.6. PWM .....	16
2.7. Konstrukcija portalnog dvoosnog traslanlatora.....	18
2.7.1. Zahtjev na radni prstor odnosno hod translacijskih osi.....	19
2.7.2. Kostrukcija klizača i linearnih vodilica.....	20
2.7.3. Smještaj motora te enkodera .....	21
2.7.4. Popis mehaničkih dijelova makete.....	22
3. Istosmjerni(DC) motor .....	23

4. Regulacija servo-motora.....	24
4.1. PID regulator brzine vrtnje.....	25
4.2. PID regulator položaja .....	26
4.3. Kaskadna PI struktura regulatora položaja unutarnjom PI petljom regulacije brzine vrtnje .....	27
5. Program u mikrokontroleru .....	28
5.1. Komunikacija s računalom.....	28
5.2. Mjerenje pozicije odnosno brzine.....	29
5.3. Načelo regulacije .....	30
6. Rezultati eksperimenata .....	32
6.1. Pozicioniranje – Pregulator .....	32
6.2. Pozicioniranje – PI regulator.....	33
6.3. Pozicioniranje – PID regulator .....	34
6.4. Kompenzacija poremećaja .....	35
6.5. Utjecaj ograničenja upravljačke veličine .....	36
7. Program na računalu .....	37
7.1. Grafičko sučelje.....	37
8. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42
PRILOZI .....	43

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Princip prijenosa gibanja .....	3
Slika 2.	Eksperimentalni postav .....	4
Slika 3.	Motor RH7-1531 .....	5
Slika 4.	Detalj inkrementalnog davača.....	6
Slika 5.	Energetski sklop .....	7
Slika 6.	Motor TD-035-220 .....	8
Slika 7.	Mehanička karakteristika motora.....	9
Slika 8.	Odabrani inkrementalni davač(3D model) .....	10
Slika 9.	Pin dijagram mikrokontrolera ATMEGA16 u PDIP kućištu .....	11
Slika 10.	Blok shema mikrokontrolera .....	12
Slika 11.	Struktura I/O pina.....	13
Slika 12.	Blok-shema Timer/Counter1 jedinice .....	14
Slika 13.	Načelo impulsnog napajanja istosmjernog motora[3] .....	17
Slika 14.	Moderni četverokvadrantni istosmjerni pogon[7].....	17
Slika 15.	Portalni 'X-Y' translator .....	18
Slika 16.	Radni prostor stroja .....	19
Slika 17.	Prikaz linearne vodilice i kasete klizača.....	20
Slika 18.	Smještaj enkodera i motora poprečne osi .....	21
Slika 19.	Smještaj enkodera i motora uzdužne osi .....	21
Slika 20.	Blok-shema servosustava .....	24
Slika 21.	Struktura PID regulatora brzine vrtnje .....	25
Slika 22.	Struktura PID regulatora položaja.....	26
Slika 23.	Struktura kaskadne regulacije položaja .....	27
Slika 24.	Odzivi P regulatora.....	32
Slika 25.	Odzivi PI regulatora .....	33
Slika 26.	Odzivi PID regulatora.....	34
Slika 27.	Upravljačka veličina(zeleno) i pozicija(plavo) .....	35
Slika 28.	Kompenzacija poremećaja .....	35
Slika 29.	Odziv s ograničenjem upravljačke veličine .....	36
Slika 30.	Izgled glavnog prozora aplikacije .....	37
Slika 31.	Izbornik 'Setup' alatne trake.....	38
Slika 32.	Prozor 'Communitation' .....	38
Slika 33.	Poruke o stanju serijske veze .....	38
Slika 34.	Izbornik 'Control' alatne trake.....	39
Slika 35.	Prozor 'Control parameters'.....	39
Slika 36.	Prozor 'Limits' .....	39
Slika 37.	Opcije izbornika 'Help' alatne trake .....	40



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podaci o korištenom motoru .....	5
Tablica 2. Specifikacije motora.....	9
Tablica 3. ENC-A21-1250-236-H-G.....	10
Tablica 4. Popis dijelova i cijena.....	22

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 106-100-1    Nacrt translatora
- 106-100-2    Bokocrt translatora
- 106-100-3    Tlocrt i izometrija translatora

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$U_{M,N}$	V	nazivni napon elektromotora
$n_{M,N}$	$\text{min}^{-1}$	nazivna brzina elektromotora
$n_{M,T}$	$\text{min}^{-1}$	brzina praznog hoda elektromotora
$I_{M,N}$	A	nazivna struja elektromotora
$I_{M,T}$	A	struja praznog hoda elektromotora
$I_{M,K}$	A	struja kratkog spoja elektromotora
$R_{RED}$	$\text{min}^{-1} / \text{min}^{-1}$	prijenosni omjer reduktora
$n_{R,N}$	$\text{min}^{-1}$	nazivna izlazna brzina reduktora
$R$	$\Omega$	ukupni otpor elektromotora
$R_u$	$\Omega$	unutrašnji otpor izvora
$E_m$	V	inducirani napon armature
$L$	H	induktivitet
$P_M$	W	nazivna snaga motora
$T_M$	Nm	nazivni moment motora
$L_a$	mm	ukupna duljina zupčastog remena
$s_p$	mm	razmak osi remenica
$d_p$	mm	diobeni promjer remenice
$v$	m/s	brzina translacijske osi
$\Delta\varphi$	rad	kut zakreta motora
$\Delta x$	mm	pomak osi
$\varepsilon$	/	pomak vratila elektromotora izražen impulsima enkodera
$\omega$	$\text{min}^{-1}$	brzina vratila elektromotora
$N$	/	broj bitova PWM
$D_{prescale}$	/	prescale vrijednost
$\beta$	$^\circ$	obuhvatni kut remena
$N_z$	/	broj zubaca remenice
$F$	mm	širina remena
$T$	mm	diobeni korak remena

## SAŽETAK

U većini tehničkih sustava javlja se potreba za pozicioniranjem. Uređaji za pozicioniranje takvih sustava najčešće se sastoje od automatski reguliranih elektro-mehaničkih komponenti kojima upravlja računalo. U procesu tumačenja principa automatske regulacije sustava vrlo je važno prikazati usporedbu različitih klasičnih i naprednih metoda regulacije, te njihove praktične izvedbe. Eksperimentalni prikaz procesa regulacije na stvarnom sustavu omogućava studentima da lakše razumiju i savladaju teorije upravljanja servosustavima, pri čemu je nužno biti dobro upoznat s radom klasičnog PID regulatora.

U ovom radu obrađen je postupak projektiranja makete regulatora pozicije preko kuta zakreta motora te regulatora brzine koja bi služila u nastavne svrhe. Također projektirano je sučelje za mikrokontrolersko upravljanje koje u sebi sadrži digitalni regulator prema zahtjevima regulacije kuta zakreta istosmjernog motora.

Ključne riječi: **PID regulator, edukacijska maketa, servomotor, servosustavi, regulacija brzine vrtnje, regulacija kuta zakreta, inkrementalni davač, mikrokontroler**

## SUMMARY

In most technical systems there is a need for positioning. Positioning devices in such systems most often consist of automatically controlled electro-mechanical components governed by a personal computer. In the process of interpreting the basic principle of automatic control systems, it is very important to demonstrate the comparison between different conventional and advanced methods of control and their practical performance. Experimental setup of the real process control system enables students to understand and master the theories of servosystems control, whereby a good knowledge of the classical PID controller is crucial.

In this paper, the design process of a mock up for positioning system is described, which would serve the purpose of teaching. Also, the interface with microcontroller is designed that incorporates a digital controller for the task requirement of the DC motor angle control.

**Key words:** PID controller, educational mock up, servomotor, servosystems, speed control, angle control, incremental encoder, microcontroller

## 1. UVOD

Pojam regulacije podrazumijeva postojanje neke vrste povratne veze s informacijom stanja reguliranog sustava. Danas su u praksi to najčešće nekakvi električni signali koji nose informaciju o izlazima procesa regulacije. Razvojem elektronike, posebice analognih pojačala razvili su se i prvi regulatori koji su bili u stanju implementirati željeni regulacijski princip na temelju manipulacije s analognim signalima i veličinama. U skorije vrijeme regulatori se implementiraju u mikrokontrolere čime je moguće ostvariti mnoge druge funkcije te olakšati upravljanje procesom korištenjem računala kao sučelja za postavljanje regulacijskih veličina.

Najšire rasprostranjeni su klasični PID regulatori, zbog svoje jednostavnosti i robusnosti. U okviru edukacije studenta poželjno je studentu dati uvid u razvoj regulatora, osnovne principe te poteškoće i probleme u projektiranju kako bi došlo do boljeg shvaćanja funkcija regulatora. U ovom radu detaljno je opisano projektiranje jednog takvog regulatora u smislu makete na kojoj su vidljivi temeljni principi automatske regulacije pomoću mikrokontrolera.

## 2. Projektiranje makete

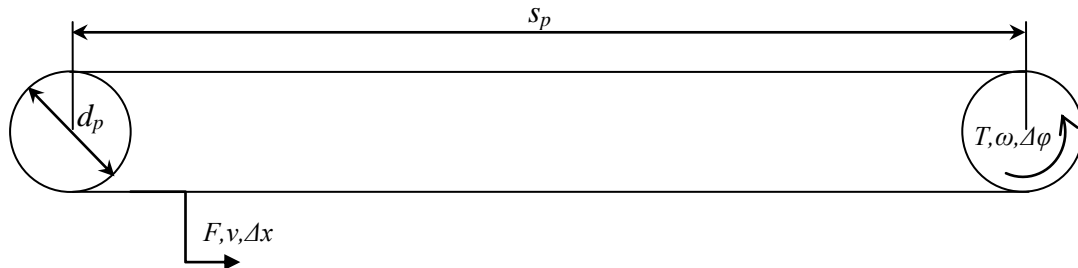
Prilikom projektiranja uređaja moramo najprije razmotriti sve zahtjeve postavljene na konstrukciju istog kako bismo mogli početi s odabirom komponenata. Potrebno je odrediti glavne komponente koje određuju većinu konstrukcijskih značajki, te se ne mogu mijenjati jer bi to utjecalo na promjenu čitave konstrukcije. U slučaju regulacijske makete opisane u ovom radu glavne komponente određene su zahtjevima na konstrukciju da pogon makete treba osigurati DC(istosmjernim) motorom te mjerenje kuta zakreta dvokanalnim inkrementalnim davačem. Također jedan od zahtjeva je upravljanje maketom putem mikrokontrolerskog sklopa koji naredbe za regulaciju s računala treba primiti preko serijske RS232 komunikacije.

### 2.1. Zahtjevi regulacije

Postavljen je problem pozicioniranja, odnosno regulacije pozicije neke translacijske osi. Translacijske osi pogonjene elektromotorom mogu biti ostvarene na nekoliko različitih načina. Prijenos rotacijskog gibanja u translatorno gibanje osi gdje postoji zahtjev za precizno pozicioniranje može se ostvariti pomoću:

- navojnog vretena - najčešće se koristi u alatnim strojevima zbog mogućnosti prenošenja velikih sila, velike preciznosti, robusnosti te ponovljivosti; često se mogu izvesti kao samokočni mehanizam koji konstrukcijski preuzima udare sila i smanjuje utjecaj na promjenu momenta motora.
- zupčaste letve - također se primjenjuju u alatnim strojevima, uglavnom za dostavna gibanja gdje nije nužna velika preciznost i ponovljivost; tribološki su mnogo osjetljivije i izloženije trošenju uslijed manje dodirne površine putem koje se ostvaruje prijenos sile te stvaraju buku.
- zupčastog remena - najčešće se rabe za pogon uredskih strojeva, audio i video tehnici te u ostalim primjenama gdje postoji zahtjev za velikom brzinom pozicioniranja, dok nije potrebno prenijeti velike sile i postići visoke ponovljivosti, ali i tihi rad.

Za potrebe makete servosustava odabrat ćemo prijenos gibanja zupčastim remenom zbog manje cijene te izostanka potrebe za prijenosom većih sila.



**Slika 1. Princip prijenosa gibanja**

Jasno je vidljivo kako prikazuje Slika 1. da se rotacijsko gibanje vratila motora pretvara u translatorno gibanje točke na remenu, što za naš slučaj pozicioniranja znači da se  $\Delta x$  pozicija translacijske osi može izraziti, odnosno mjeriti kutom zakreta vratila motora  $\Delta\phi$  pomoću izraza (1).

$$\Delta x = \frac{\Delta\phi \cdot d_p}{2} \quad (1)$$

Imajući u vidu elastičnost remena kao ograničavajući faktor preciznosti, možemo ustvrditi da će nam biti dovoljno mjeriti kut zakreta zupčaste remenice odnosno vratila motora s onom preciznošću koju nam remen duljine  $L_a$  na zadanom razmaku osi  $s_p$  određuje svojom elastičnošću. Navedena spoznaja je bitna za dimenzioniranje komponenata mjernog sustava.

$$T = \frac{F \cdot d_p}{2} \quad (2)$$

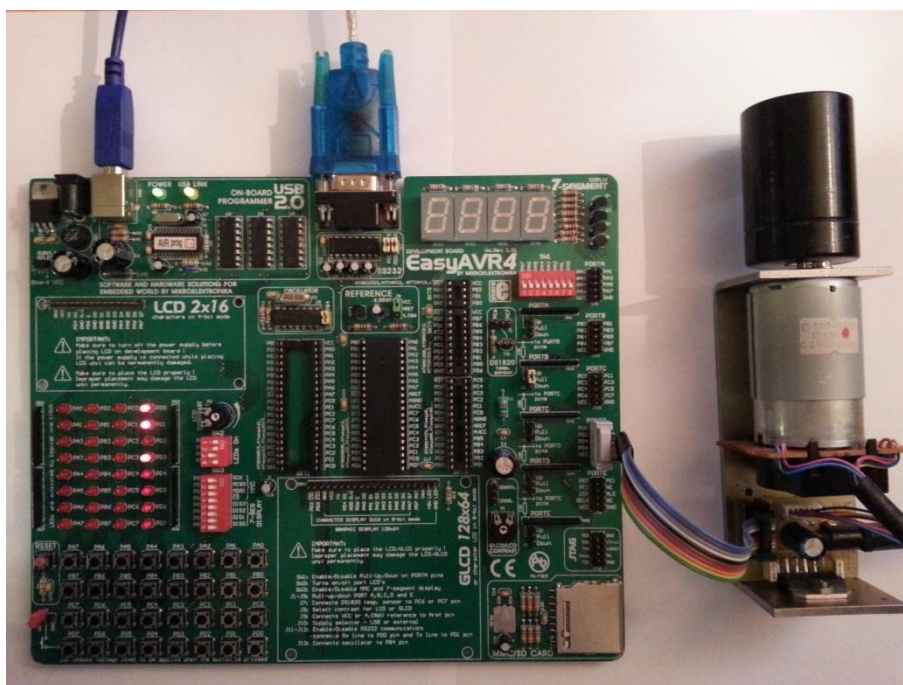
$$P = F \cdot v \quad (3)$$

Prema izrazima (2) i (3) možemo pristupiti dimenzioniranju komponenata energetskog sustava uzevši u obzir željenu brzinu sustava  $v$  te silu  $F$  koju sustav mora biti kadar savladati. Naravno, potrebno je uzeti određeni faktor sigurnosti uslijed gubitaka kojima pridonose trenja valjnih ležajeva i savijanje remena.



## 2.2. Eksperimentalni postav

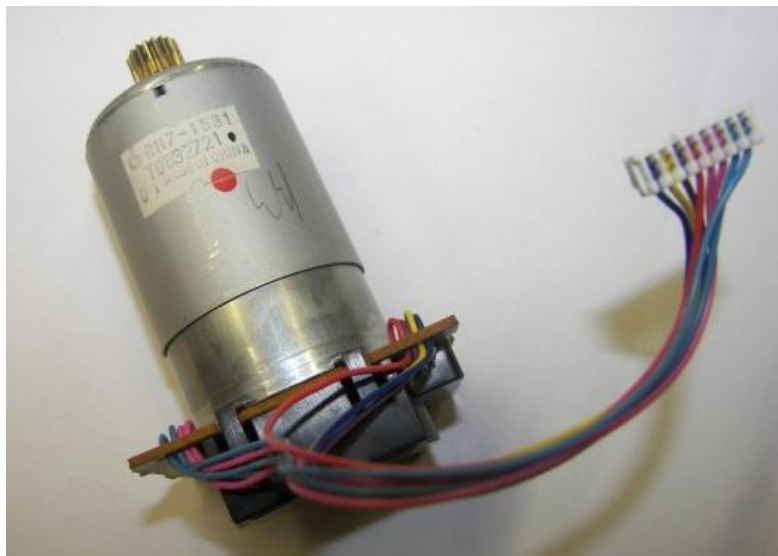
U svrhu razvoja makete te ispitivanja algoritma regulacije, odnosno komunikacije sučelja korišten je eksperimentalni postav s DC motorom, enkoderom, te energetskim pojačalom za uspostavljanje struje armature spojenim na razvojni sustav za mikrokontrolere iz obitelji AVR. Postav je prikazan Slici 2, na kojoj je moguće vidjeti komponente korištene za eksperiment. Sustav je povezan na računalo putem serijske RS232 komunikacije, te je na vratilo motora ugrađen istokareni zamašnjak od poliacetalne plastike koji simulira mali inercijalni teret i služi usporenju inače jako brzog odziva malog motora.



Slika 2. Eksperimentalni postav

### 2.2.1. Motor

U eksperimentalnom postavu korišten je motor RH7-1531 vidljiv na Slici 3 koji ima karakteristike vidljive u Tablici 1. Motor je dobavljiv putem interneta(eBay), te ima cijenu oko 20\$, a prilično je rasprostranjen jer ga je moguće pronaći i u HP-ovom printeru LaserJet 2500 gdje služi za pogon papira(paper feed).



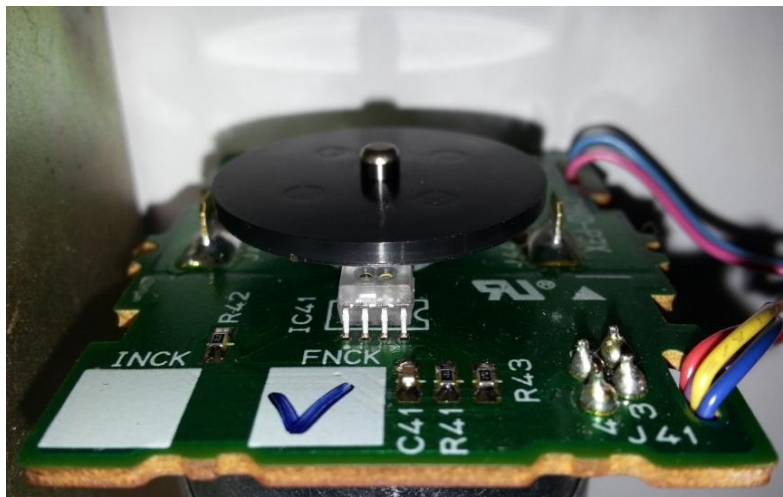
Slika 3. Motor RH7-1531

Tablica 1. Podaci o korištenom motoru

Napon armature, $U_{M,N}$ :	0-12V
Otpor armaturnog namota, $R$ :	23 $\Omega$
Struja kratkog spoja, $I_{M,K}$ :	500 mA
Brzina praznog hoda, $n_{M,N}$ :	2250 min <sup>-1</sup>

### 2.2.2. Inkrementalni davač(enkoder)

Korišteni motor u eksperimentalnom postavu, na sebi već ima ukomponiran dvokanalni refleksijski inkrementalni davač s rezolucijom od 200 impulsa po okretaju. Napajanje enkodera je 5V kao i razina izlaznih signala(TTL) koje je moguće direktno dovesti na ulazne terminale(pinove) mikrokontrolera.



Slika 4. Detalj inkrementalnog davača

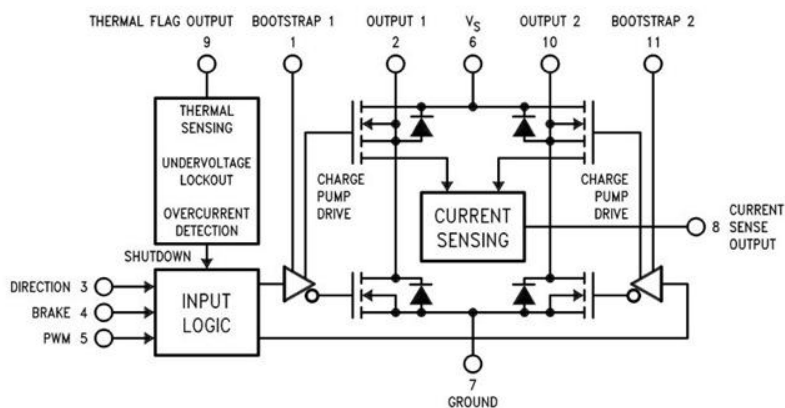
### 2.2.3. Razvojni sustav

Za razvoj mikrokontrolerske jedinice u upravljačkom sklopu korišten je razvojni sustav EasyAVR proizvođača Mikroelektronika(Slika 2. Eksperimentalni postav). Razvojni sustav na sebi ima SPI serijski programator koji preuzima podatke sa računala putem USB komunikacije kojom ujedno i napaja cijeli razvojni sustav. Također, na sustavu je već postavljen level-converter MAX232 za omogućavanje serijske komunikacije prema računalu.

### 2.2.4. Energetski sklop

Energetski sklop za razvijanje struje(max. 3A) armature preko odvojenog naponskog izvora izveden je pomoću integriranog pojačala LMD18200 koji u sebi sadrži logičku jedinicu za upravljanje te tranzistorski H-most za četverokvadrantni rad motora. Integrirani krug u sebi sadrži protuparalelno spojene diode za zaštitu tranzistora od induciranog protunapona zavojnice aramturnog kruga, te zahtjeva minimalan broj perifernih komponentata za rad što ga čini povoljnim za primjenu u malim servopogonima. Logička jedinica zahtjeva samo tri različita signala na ulazu za postavljanje motora u rad:

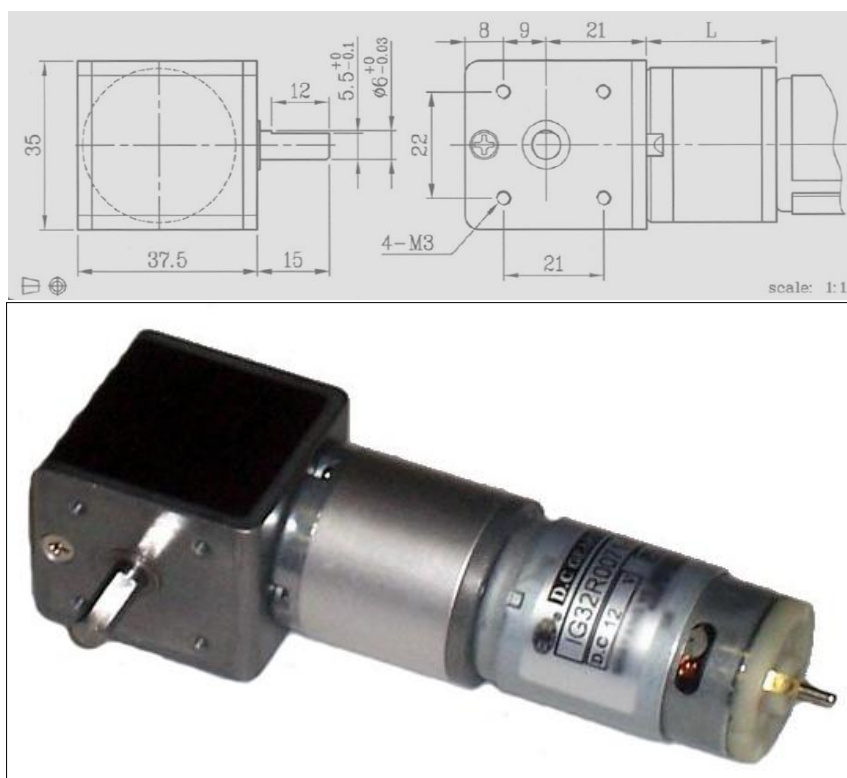
- PWM –pulsno širinska mod. za upravljanje strujom armature faktorom popunjenosti
- DIR – smjer struje na kolektoru DC motora
- BRAKE – opcija uključivanja otpornika za generatorsko elektrodinamičko kočenje



Slika 5. Energetski sklop

### 2.3. Motor

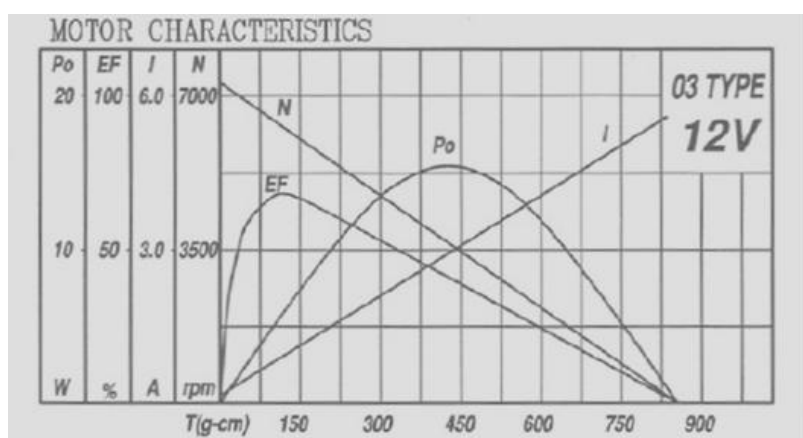
Na osnovu izraza (2) i (3), možemo uz odabrani diobeni promjer pogonske zupčaste remenice  $d_p$ , te željene brzine sustava  $v$  u okviru 250mm/s, te potrebne sile svladavanja  $F$  u iznosu od 10N, odabrati elemente energetskog sustava odnosno odabrati pogonski elektromotor koji će zadovoljavati zahtjevane specifikacije. Imajući na umu da se radi o edukacijskoj maketi koja bi trebala biti pristupačna cijenom, te nije nužna izuzetna kvaliteta motora, uzeti su u obzir motori od dobavljača koji će zadovoljiti takve kriterije. Odabran je motor TD-035-220 s ugrađenim planetarnim prijenosnikom te kutnim izlaznim vratilom kod dobavljača SuperDroidRobots([www.superdroidrobots.com](http://www.superdroidrobots.com)).



Slika 6. Motor TD-035-220

Tablica 2. Specifikacije motora

Cijena:	$\approx 45\$(\text{web})$
Snaga $P_M$ :	7W
Napon armature $U_{M,N}$ :	0-12V
Nazivni moment $T_N$ :	110 gcm
Struja praznog hoda, $I_{M,T}$ :	150 mA
Struja nazivnog tereta, $I_{M,N}$ :	900 mA
Brzina praznog hoda, $n_{M,T}$ :	7300 min <sup>-1</sup>
Brzina pri nazivnom teretu, $n_{M,N}$ :	5950 min <sup>-1</sup>
Ukupni prijenosni omjer $R_{RED}$ :	1/27
Izlazna brzina planetarnog prijenosnika, $n_{R,N}$ :	220 min <sup>-1</sup>
Izlazni moment $T_{N,I}$ :	2.1 kgcm



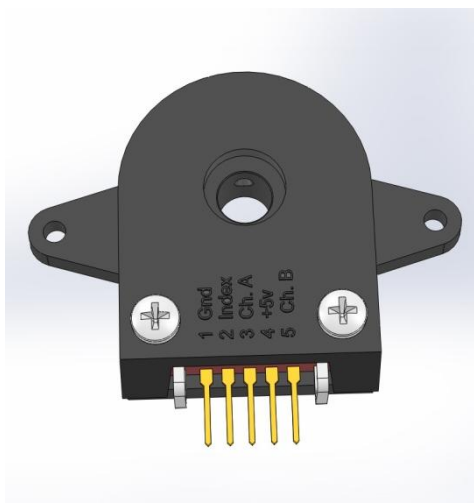
Slika 7. Mehanička karakteristika motora

## 2.4. Inkrementalni davač(enkoder)

Slično kao i u slučaju odabira motora za edukacijsku maketu, prilikom odabira inkrementalnog davača također je trebalo imati u vidu cijenu i složenost/kvalitetu izvedbe enkodera koji bi se razmatrao za ugradnju na maketu. Odabrani su inkrementalni davači od dobavljača AnaheimAutomation([www.anaheimautomation.com](http://www.anaheimautomation.com)) američke proizvodnje kompatibilnih sa široko rasprostranjenim US-digital ili AVAGO-industries enkoderima. Enkoder u izvedbi s dva kanala te trećim indeksnim, metričkim provrtom za vratilo od 6mm te s rezolucijom od 1250 imp/okr zadovoljava naše potrebe i uparen na istom vratilu sa odabranim zupčastim remenicama diobenog promjera  $d_p=22.45\text{mm}$  nam daje mogućnost pozicioniranja translacijske osi u koracima  $\Delta x=0.056\text{mm}$  što je nešto više od pola desetine milimetra čime zadovoljavamo potrebu finoće pozicioniranja, a ujedno ne prelazimo mogućnosti određene krutošću translacijskog pogona zupčastim remenom i materijalom izrade makete. Navedeni inkrementalni davač je dobavlјiv putem web-trgovine dobavljača pod kataloškim brojem ENC-A21-1250-236-H-G.

**Tablica 3. ENC-A21-1250-236-H-G**

Cijena:	$\approx 63\$$ (web)
Provrt za vratilo:	6 mm
Rezolucija:	1250 imp/okr
Broj kanala:	2+Index



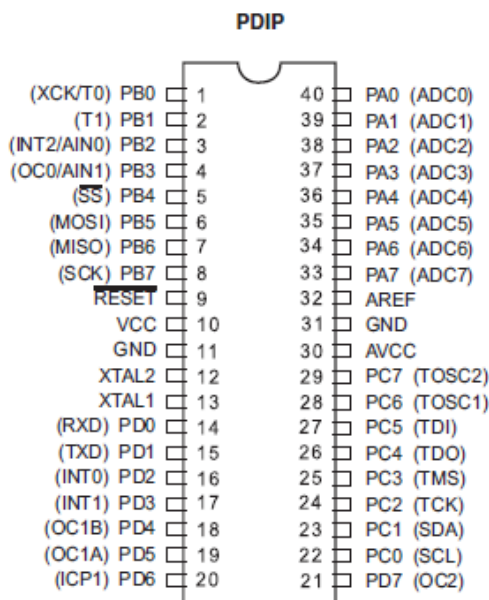
**Slika 8. Odabrani inkrementalni davač(3D model)**



## 2.5. Mikrokontroler ATmega16

### 2.5.1. Arhitektura

Mikrokontroler ATMEGA 16 je 8-bitni mikrokontroler tvrtke ATMEL. Osnovan je kao moderni 8-bitni RISC mikroprocesor koji sadrži 32 registra opće namjene, 16K flash memorije koja služi za čuvanje programa koji procesor izvršava, 512 byte-a EEPROM memorije koja služi za čuvanje podataka koji ne smiju biti izgubljeni po nestanku napajanja i 1K interne SRAM memorije za čuvanje podataka. Snaga AVR mikrokontrolera je dosta iznad prosjeka - AVR mikroprocesore odlikuje velika brzina izvršavanja – do 16 MIPS, što je oko 12 puta više nego kod standardnih 8-bitnih mikroprocesora, dok su s druge strane i memorijske performance znatno poboljšane kombiniranim korištenjem Flash memorije i EEPROM memorije.

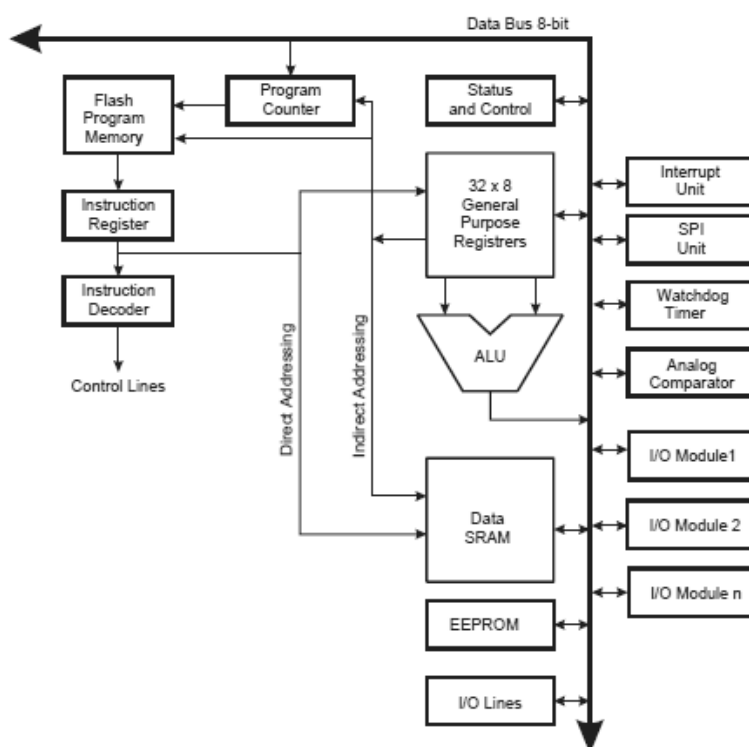


**Slika 9. Pin dijagram mikrokontrolera ATMEGA16 u PDIP kućištu**

MEGA AVR obitelj mikrokontrolera ima jedinstvenu memoriju s mogućnošću samoprogramiranja (Self-Programming Memory), kao i mogućnost čitanja iz memorije tokom upisa (Read while Write). Mikrokontroleri iz ove obitelji se mogu naći u verzijama s 8-128K Flash memorije, do 4K EEPROM-a i do 4K RAM-a, i dolaze u 32-64 pinskom pakiranju. Usmjereni su na specijalizirane segmente tržišta, i često se koriste kao komponente u prenosivim uređajima, bežičnoj komunikaciji i sigurnosnim uređajima. Procesorska jezgra je bazirana na AVR RISC arhitekturi koja je zajednička za sve mikrokontrolere AVR obitelji.



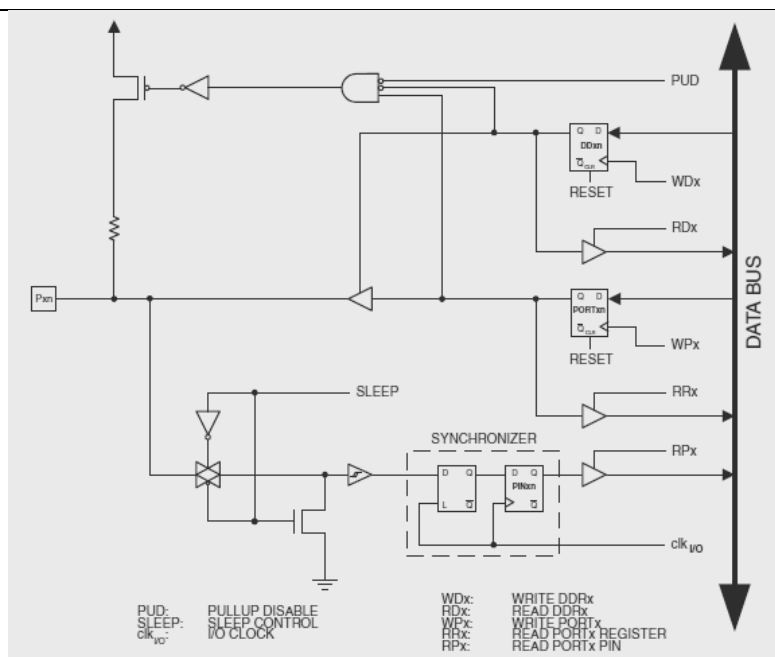
Ovo nosi beneficiju jednostavnijeg programiranja u slučaju promjene mikrokontrolera u toku faze projektiranja (nema potrebe za izmjenom napisanog koda, već se piše samo dodatni kod za rad sa specifičnim komponentama novog mikrokontrolera). Blok shema mikrokontrolera na Slika 10. Blok shema mikrokontrolera je preuzeta iz dokumenta Atmel ATmega16.pdf koji se nalazi na priloženom CD-u.



Slika 10. Blok shema mikrokontrolera

### 2.5.2. I/O portovi

Mikrokontroler ATMEGA16 posjeduje četiri ulazno-izlazno porta. To su portovi PORTA, PORTB, PORTC, PORTD koji imaju po osam izvedenih pinova na kućištu procesora. Svi pinovi su multipleksirani i imaju dodatne funkcije ovisno koja se od perifernih jedinica koristi. Tako se primjerice na pinovima porta A nalaze analogni ulazi A/D konvertera. Svaki od pinova može se konfigurirati kao ulazni ili kao izlazni pin bez obzira kako su konfigurirani ostali pinovi istog porta. Na sljedećoj slici je prikazana struktura ulazno-izlaznog pina.

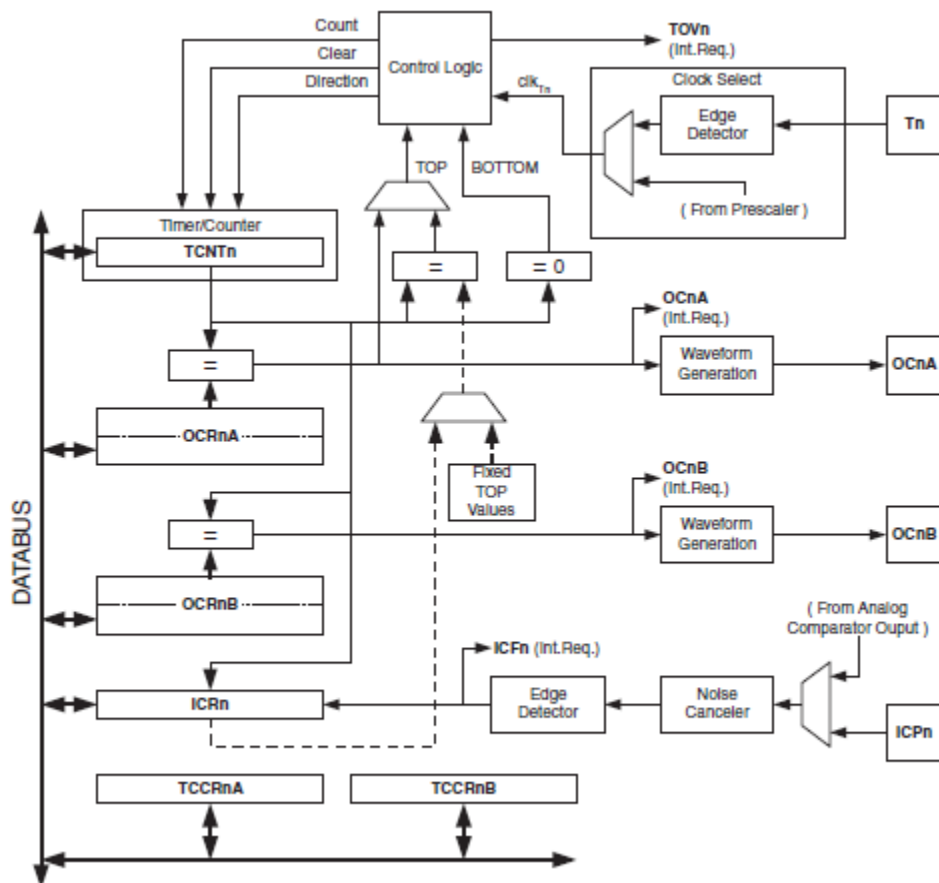


Slika 11. Struktura I/O pina

Svaki pin ima interni pull up otpornik koji se programski može uključiti ili isključiti. Svakim portom se upravlja pomoću tri I/O registra. To su registri  $DDRx$ ,  $PORTx$ ,  $PINx$  gdje umjesto  $x$  treba stajati oznaka porta (A,B,C ili D). Data Direction Register  $DDRx$  služi za određivanje smjera podataka, tj. da li će port biti definiran kao ulazni ili kao izlazni. Ovaj registar je 8-bitni i svaki bit u ovom registru određuje koji će pin biti izlazni a koji ulazni. Primjerice ukoliko želimo podesiti da svi pinovi porta C budu izlazni treba u programu pisati  $DDRC=0xFF$ , ili  $DDRC=0b11111111$ . Ako se želi da svi pinovi porta C budu ulazni onda treba napisati  $DDRC=0x00$ , ili  $DDRC=0b00000000$ . Podešavanjem pojedinačnih bitova se može podesiti da pinovi budu ulazni ili izlazni u okviru istog porta. Registar  $PORTx$  je registar podataka. Ako je prethodno podešeno da su pinovi izlazni i ako se određeni bitovi u registru  $PORTx$  postave na jedinicu ili nulu stanje se odmah preslikava na izlaz. Primjerice ako je registar  $DDRC=0b00001111$ , a registar  $PORTC=0b11001010$  i ako su pull up otpornici isključeni, na pinovima od P7 do P4 će se biti stanje visoke impedancije, jer su ovi pinovi definirani kao ulazni i njihovo stanje ne ovisi o sadržaju  $PORTC$  registra. Na pinovima od PD0 do PD3 koji su definirani kao izlazni imamo preslikano stanje iz  $PORTC$  registra, odnosno 1010.  $PINx$  registar je namijenjen samo za čitanje stanja pinova bez obzira da li su definirani kao ulazni ili kao izlazni. Za pinove koji se ne koriste preporučljivo je da ih definiramo kao ulazne i da se postave na neki logički nivo. Ovo se najlakše postiže uključivanjem internih pull-up otpornika.

### 2.5.3. Timeri

ATmega16 posjeduje tri Timer/Counter jedinice. Timer/Counter0 i Timer/Counter2 su 8-bitni dok je Timer/Counter1 16-bitni. Za realizaciju ovog rada korišten je Timer/Counter1 koji ima dva hardverska PWM kanala te Timer/Counter2 za potrebe mjerenja realnog vremena i računanje vremenskih diferencijala. Ukoliko konfiguriramo Timer/Counter jedinicu da radi kao timer, to znači da je inkrementiranje ili dekrementiranje registra pokretano frekvencijom sistemskog sata. Timer/Counter jedinice posjeduju i ugrađene prescale jedinice za dijeljenje frekvencije sistemskog sata u iznosima od 1,8,64,256 ili 1024. Detaljni opisi za Timer/Counter jedinice su prikazani u proizvođačevom opisu Atmel ATmega16.pdf priloženom na CD-u.



Slika 12. Blok-shema Timer/Counter1 jedinice

Timer/Counter1 (TCNT1) ima dva output compare registra (OCR1A, OCR1B) i jednu input capture jedinicu (ICR1). Output compare registri uspoređuju svoj sadržaj sa sadržajem

brojača i kad se njihovi sadržaji poklope postavljaju se OCF1A ili OCF1B flag TIFR registra ovisno čiji se sadržaj poklopio sa stanjem brojača. Ako su globalno omogućeni prekidi i ako su postavljeni bitovi OCIE1A ili OCIE1B pozivaju se prekidne rutine Timer1CompA ili Timer1CompB. Ovo je zgodna značajka AVR mikrokontrolera koja omogućava da se korisnik ne treba brinuti o generiranju PWM signala, već se izlazni pin kontrolera automatski postavlja i gasi ovisno o onome što smo unijeli u output compare registre. Frekvencija PWM signala određena je ovisno o  $D_{prescale}$  vrijednosti koju koristimo za dijeljenje frekvencije sistemskog sata te o odabranom broju bitova  $N$  output compare registra(8,9 ili10)

$$f_{PWM} = \frac{f_{CLK}/D_{prescale}}{2^{N+1} - 2} \quad (4)$$

Što u našem slučaju odabranog 10-bitnog PWM-a i prescale vrijednosti 8 iznosi 488.75 Hz.

## 2.6. PWM

Elektroničko upravljanje brzine vrtnje[3] u našem se slučaju ostvaruje brzim susljednim priključivanjem i odspajanjem armature motora na izvor istosmjernog napona konstantnog iznosa  $U_1$  (Chopper princip). Pri uzastopnom otvaranju i zatvaranju zaklopke  $S$  motor se napaja nizom uzastopnih pravokutnih impulsa  $u_2(t)$ . U krugu postoje omski otpori  $R$  i induktiviteti  $L$  armaturnog kruga motora te  $R_u$  koji predstavlja unutrašnji otpor izvora zajedno s otporom sklopke  $S$ . Napon  $u_2$  pokriva padove napona na induktivitetu i omskom otporu te inducirani napon armature  $E_m$ .

Tijekom vremena uključenja sklopke  $t_u$  vrijednost struje  $i_m$  raste eksponencijalno s vremenskom konstantom:

$$T_u = \frac{L}{R + R_u} \quad (5)$$

U vremenu isključenja  $t_i$  zbog energije nakupljene u induktivitetu  $L$  struja i dalje teče zatvarajući se kroz diodu  $D(i_m=i_d)$  i smanjuje se eksponencijalno s vremenskom konstantom:

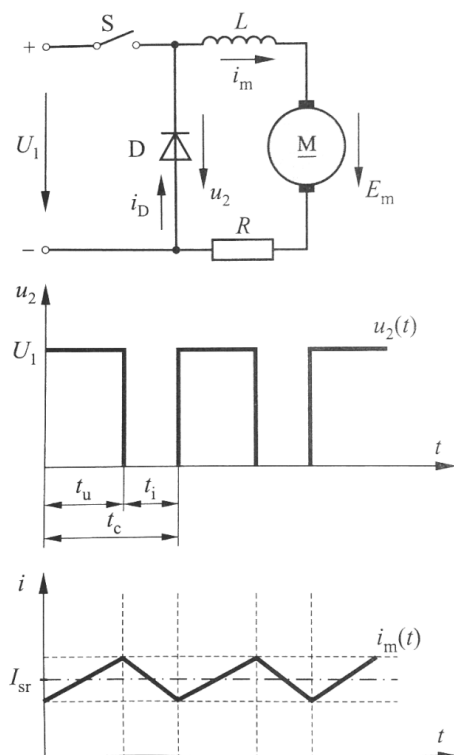
$$T_i = \frac{L}{R} \quad (6)$$

Zbroj ta dva vremena predstavlja vrijeme ciklusa  $t_c$  i određeno je frekvencijom PWM signala, omjer vremena uključenja  $t_u$  i vremena ciklusa  $t_c$  naziva se intermitencija  $\varepsilon$ , odnosno faktor popunjenosti PWM signala.

$$\varepsilon = \frac{t_u}{t_c} \quad (7)$$

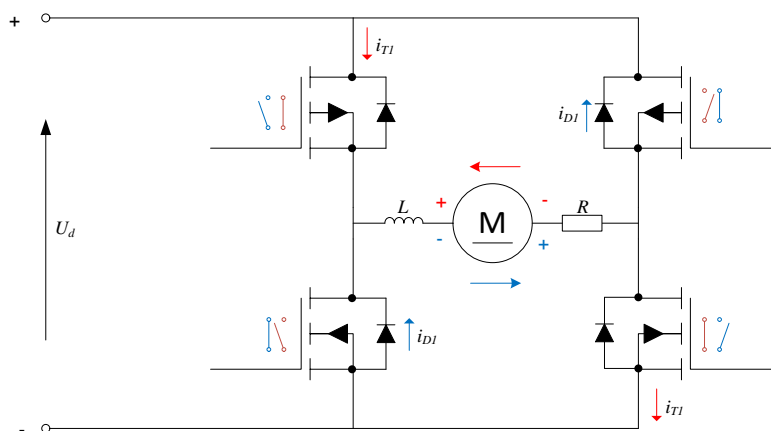
Ako srednju vrijednost pulzirajućeg napona  $u_2(t)$  označimo s  $U_2$  možemo zapisati:

$$U_2 = \varepsilon U_1 \quad (8)$$



**Slika 13. Načelo impulsnog napajanja istosmjernog motora[3]**

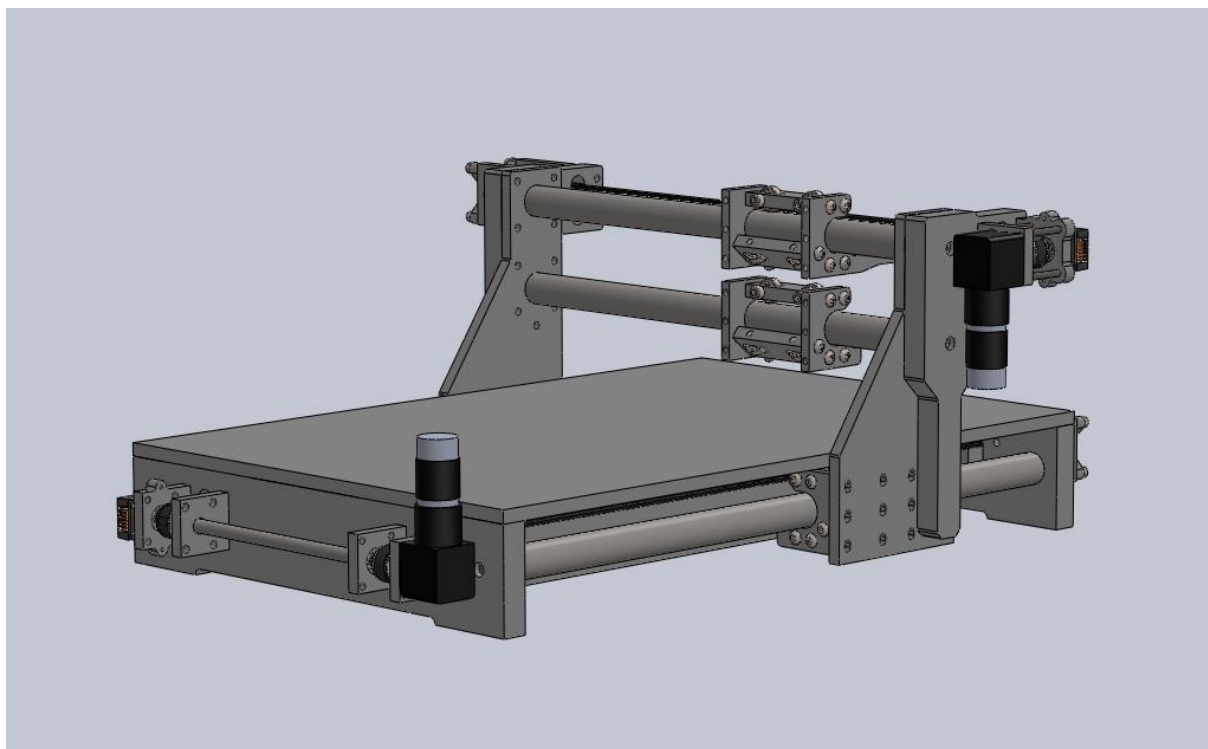
U našem slučaju sklopka je zamjenjena parom efikasnih tranzistora spojenih u takozvani H-most koji nam omogućava reverziranje smjera struje kroz armaturu motora i time četverokvadrantni rad. Načelo spajanja motora na istosmjerni pretvarač te smjerovi struja u tranzistorima karikiranih stanjima sklopki vidljivo je na Slika 14.



**Slika 14. Moderni četverokvadrantni istosmjerni pogon[7]**

## 2.7. Konstrukcija portalnog dvoosnog traslanlatora

Edukacijska maketa zamišljena je da se izvede u obliku dvoosnog translatora kojom bi se studentu moglo vjerno predočiti upravljanje alatnim strojevima i pozicioniranje pojedinih osi. Također kao jedna od glavnih značajki ovog translatora bila bi eventualna mogućnost stavljanja „plotter“ mehanizma s olovkom pokretanom jednostavnim modelarskim servomotorom. Postoje mnoge mogućnosti daljnjeg proširenja kao što su primjerice postavljanje treće, vertikalne osi s bušilicom, postavljanje noža za izrezivanje folija ili lasera za izrezivanje tanjih ploča od plastičnih masa ili graviranja.

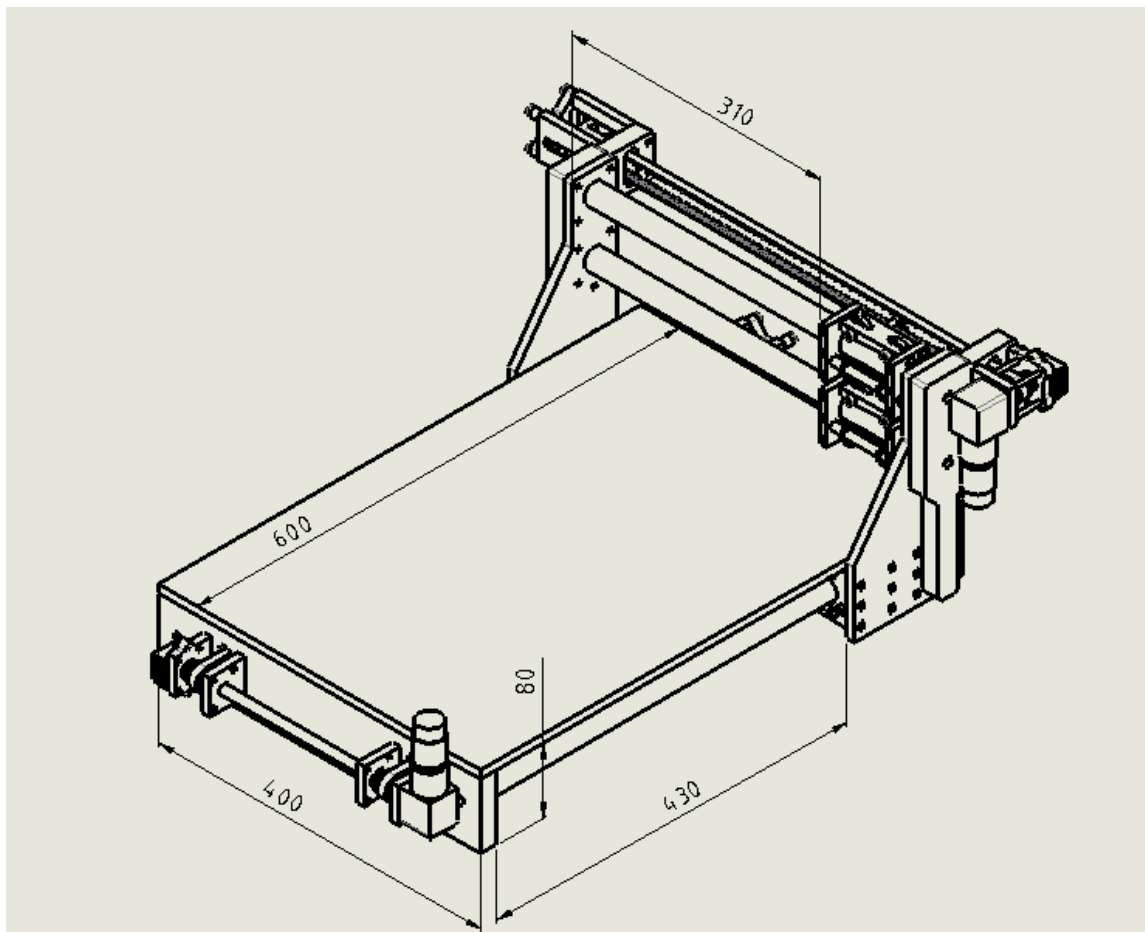


Slika 15. Portalni 'X-Y' translator

Na slici je prikazan trodimenzionalni model sklopa makete napravljen u programskom paketu DSS Solidworks. Svi dijelovi osim vodilica, valjnih ležajeva te pogonskih dijelova vratila, izrađeni su od POM(poliacetal) polimera te su konstruirani tako da ih je moguće izraditi na maloj CNC glodalici/rezačici ili izrezati laserom iz ploče kako bi cijena izrade bila čim manja.

### 2.7.1. Zahtjev na radni prstor odnosno hod translacijskih osi

Postavljen je zahtjev da minimalni radni prostor translatora bude veličine A3 formata papira koji iznosi 297mm x 420mm. U shvrhu male rezerve, ostavljeno je približno 10 mm vise prostora sa svake strane, točnije odabrani radni prostor stroja iznosi 310mm x 430mm.



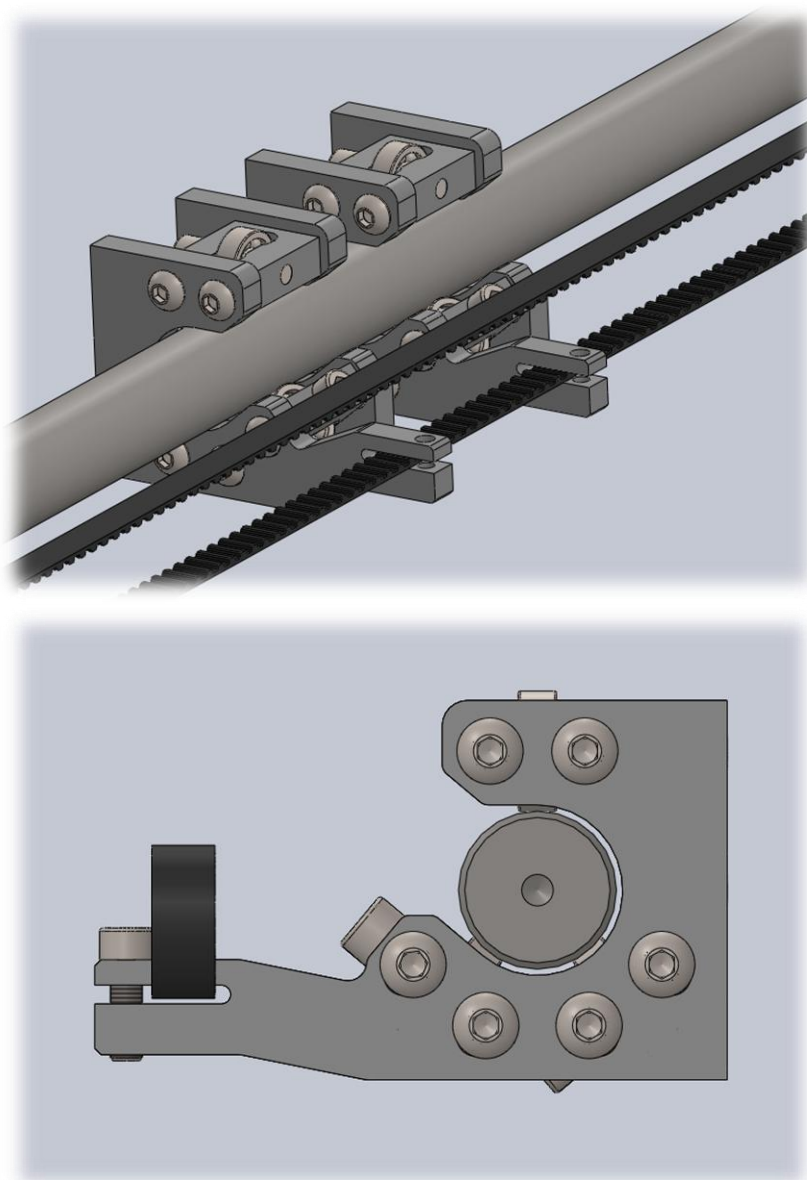
Slika 16. Radni prostor stroja

Radni prostor moguće je detaljnije vidjeti na prikazu iznad. Dimenzije radnog prostora su određivale razmak osi remenica odnosno izbor  $L_a[1]$  duljine zupčastih remena. Također, prema [1], bitan konstrukcijski zahtjev jest da najmanji broj zuba remena u zahvatu s pogonskom remenicom mora biti veći od 6, stoga su odabrane aluminijske remenice s brojem zuba  $N_z = 14$ , od kojih je 7 uvijek u zahvatu uslijed obuhvatnog kuta remena  $\beta=180^\circ$ . Zupčasti remeni predimenzionirani su kako bismo osigurali što manju elastičnost u njima i povećali preciznost stroja. Odabrani su remeni proizvođača Contitech Power Transmissions širine  $F=10$  mm, diobenog koraka  $T=5$  mm te ukupne duljine 1380 mm za jednu os odnosno 1160 mm za drugu.



### 2.7.2. Konstrukcija klizača i linearnih vodilica

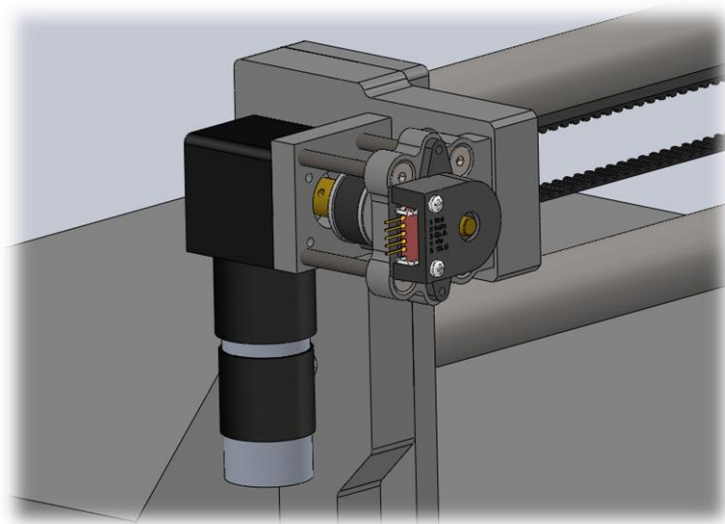
Linearne vodilice su izvedene iz šipke nehrđajućeg čelika Č.4580 promjera  $\phi 25\text{mm}$  kako bi konstrukcija bila sto kruća te progibi uslijed težine portala bili čim neprimjetniji. Klizači su izvedeni kao kasete s valjnim ležajevima koje se kotrljaju po vodilici kružnog presjeka s dodirom u tri točke. Odabrani su valjni ležajevi DIN 625 promjera 19 mm te provrta i širine 6mm. Isti valjni ležajevi su korišteni na svim ležajnim mjestima u konstrukciji stroja zbog jednostavnijeg dobavljanja i time niže cijene.



Slika 17. Prikaz linearne vodilice i kasete klizača

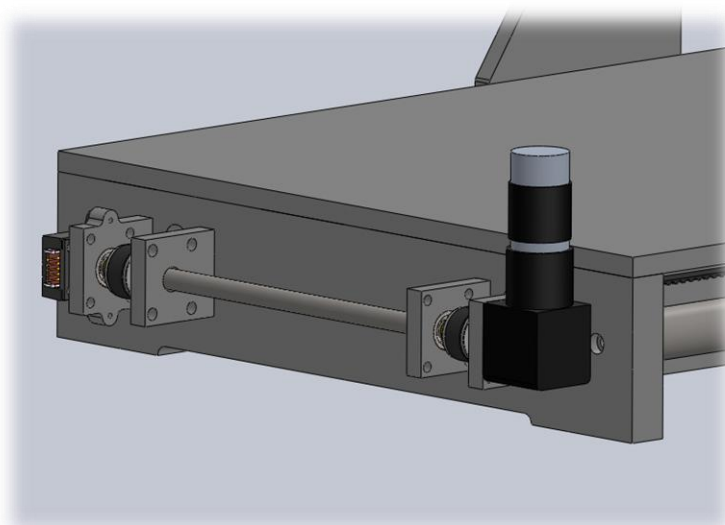
### 2.7.3. Smještaj motora te enkodera

Kako je vidljivo na slikama ispod, enkoderi su smješteni na pogonska vrtila zajedno sa remenicama, te su spojeni s izlaznim vratilom prijenosnika motora. Ovako otklanjamo bilo koje mogućnosti pogrešnog očitavanja pozicije uslijed zazora u mehanizmu prijenosnika u slučaju kad bi inkrementalni davač bio spojen izravno na vrtilo motora.



**Slika 18. Smještaj enkodera i motora poprečne osi**

Uzdužna os je pogonjena parom zapčastih remena koji su usklađeni zajedničkim pogonskim vratilom. Ovo je izvedeno na ovaj način kako bi se osigurala paralelnost kretanja rubova portala, odnosno okomitost osi bez obzira na eventualne udare sile ili različita trenja u klizačima.



**Slika 19. Smještaj enkodera i motora uzdužne osi**

#### 2.7.4. Opis mehaničkih dijelova makete

**Tablica 4. Popis dijelova i cijena**

Naziv dijela:	Količina:	Približna cijena:
Ležaj DIN 625-1(626-2Z)	36	≈5\$(10 kom - e-bay)
Remen 10 T5/1160	1	175kn(RS-Primotronic)
Remen 10 T5/1380	2	200kn(RS-Primotronic)
Remenica 21 T5/14-2	6	113kn(RS-Primotronic)
Poliacetal i rezanje	15kg + rezanje	100kn/kg(Strojopromet)
Vijci	/	300kn(Vijci Kranjec)
Motor TD-035-220	2	≈45\$(Super Droid Robots)
Enkoder ENC-A21-1250	2	≈63\$(Anaheim Automation)

Zbrojivši sve troškove, i uzevši u obzir eventualne troškove slanja naručenih dijelova dolazimo do ukupnog iznosa troškova izgradnje ovakve makete od oko približno 5000 kn.

Potpuni model makete translatora, sa svim dijelovima i sklopovima nalazi se u elektroničkom obliku na priloženom CD-R disku.

### 3. Istosmjerni(DC) motor

Pema [3] strojevi istosmjerne struje električni su rotacijski strojevi kod kojih u vanjskom strujnom krugu teče istosmjerna struja. Mogu raditi kao generatori, ili motori. Kako se istosmjerni napon danas lako dobiva ispravljanjem napona izmjenične mreže, istosmjerni su se generatori zadržali samo u nekim područjima primjene dok su istosmjerni motori još uvijek, zbog svojih vrlo dobrih regulacijskih svojstava, razmjerno široko zastupljeni u elektromotornim pogonima.

Istosmjerni stroj mora imati sklop za komutaciju koji obuhvaća kolektor(komutator), četkice i držače četkica. Kolektor reverziranjem napona omogućuje da u vanjskom krugu uvijek teče istosmjerna struja iako je u armaturnim vodičima izmjenična, zbog čega ovakve strojeve zovemo kolektorskim motorima.

Za uzbudu glavnog magnetskog polja i međusobno spajanje uzbudnog i armaturnog kruga postoje različite mogućnosti. Razni načini uzbude daju različita svojstva motorima. U našem slučaju koristimo motor koji glavno magnetno polje ostvaruje korištenjem trajnih(permanentnih) magneta te ih se često označava kao PMDC(permanent magnet DC)-motor.

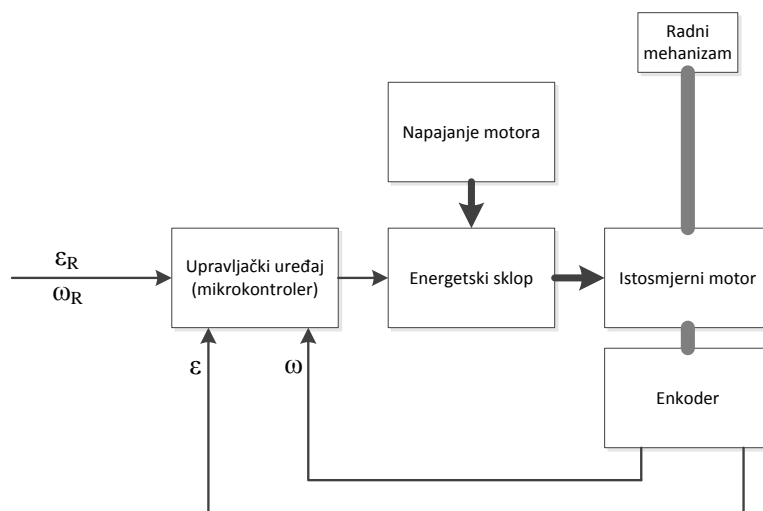
Trajni magneti za uzbudu koriste se samo kod motora manjih snaga, iako suvremeni materijali i tehnologija izrade trajnih magneta omogućuju dobivanje sve jačih magnetskih polja čime se granica snage podiže. Mali istosmjerni motori s trajnim magnetima grade se u različitim izvedbama i za veliki broj primjena. Često se izvode za mali napon(6 do 24V) i koriste se u vozilima, uredskim strojevima, medicini, robotici priključeni preko elektroničkih pretvarača u zahtjevnim reguliranim pogonima manjih snaga zbog svoje vrlo dobre mehaničke karakteristike, brzom odzivu i jednostavnošću upravljanja unatoč problemima s nepouzdanošću uslijed sklopa komutatora.

Prednosti istosmjernih motora s trajnim magnetima su:

- uzbuda ne ovisi o promjeni temperature pa pri zagrijavanju brzina ne raste,
- nema gubitaka uzbude, te je bolja korisnost i lakše hlađenje,
- manje stezaljki od strojeva s nezavisnom uzbudom i manja mogućnost kvarova,
- ne postoji opasnost od pobjega zbog konstatnog uzbudnog magnetskog polja.

#### 4. Regulacija servo-motora

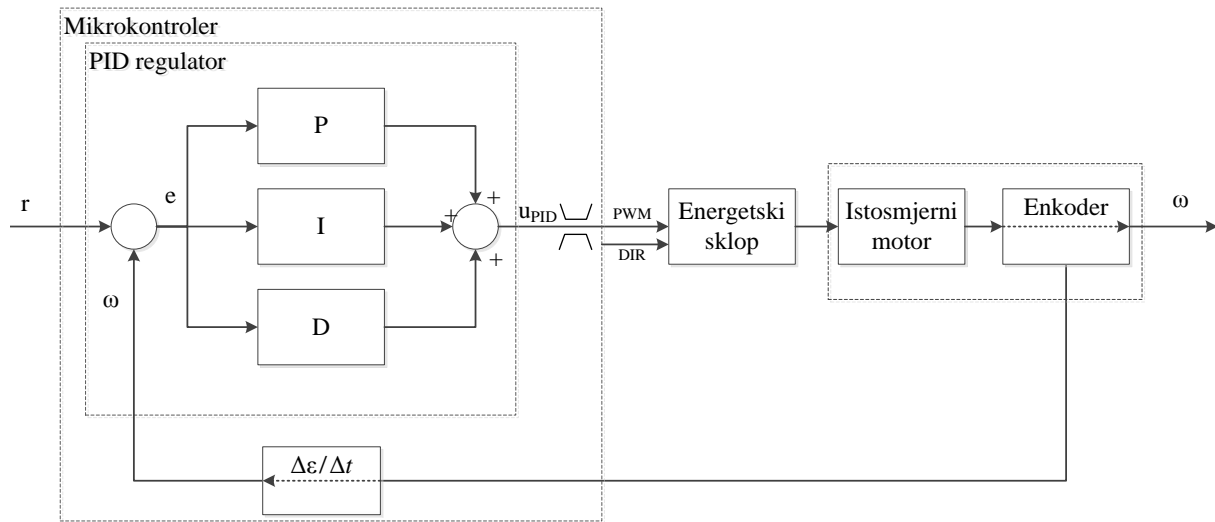
Servomotor[3] je izvršni dio reguliranog sustava za dinamičko pozicioniranje i podrazumijeva se da radi u zatvorenom regulacijskom krugu. Kako su temeljni zahtjevi pri pozicioniranju brzo i točno postizati zadani položaj i i brzinu, servo motor mora posjedovati svojstva kojima se ovi zahtjevi mogu što bolje ispuniti. Osnovna su svojstva servomotora mala mehanička i električna vremenska konstanta, a postižu se malim momentom tromosti motora, malim rasipnim tokovima, te velikim specifičnim opterećenjem materijala. Danas se kao servomotori koriste još uvijek istosmjerni motori, sve češće beskolekorski istosmjerni, vektorski upravljani asinkroni i sinkroni s trajnim magnetima. U pozicioniranju se, osobito kod malih snaga, često koriste i koračni motori, no kako obično rade bez povratne veze, ne mogu se smatrati servomotorima. Stvarne pozicije i brzine mjere se prikladnim pretvornicima koji se često ugrađuju u isto kućište s motorom. To mogu biti tahogeneratori, apsolutni i inkrementalni enkoderi, resolveri i dr.



**Slika 20. Blok-shema servosustava**

Na Slici 20. prikazana je blok-shema servosustava makete. Upravljački uređaj(mikrokontroler), obrađuje digitalne signale s enkodera, te na temelju njih i zadane reference u svom programu izvršava regulacijske petlje koje daju odgovarajuće izlaze za upravljanje energetskim sklopom koji upravlja strujom armature motora.

#### 4.1. PID regulator brzine vrtnje



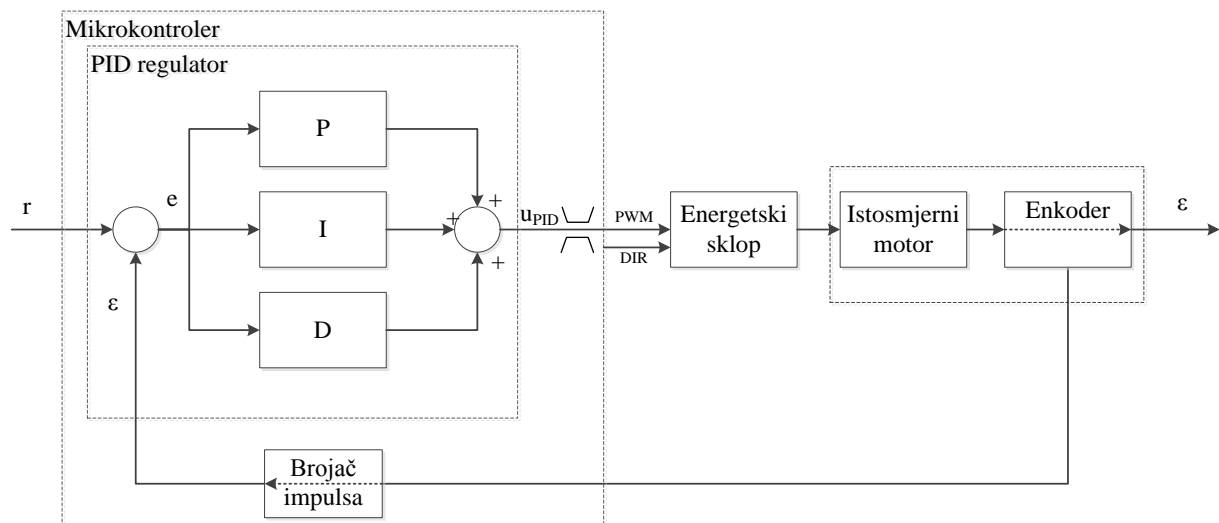
Slika 21. Struktura PID regulatora brzine vrtnje

Regulator brzine vrtnje izveden je klasičnom paralelnom(neinteraktivnom)[4] PID strukturom koja se odvija unutar programa mikrokontrolera. Algoritam ove strukture regulatora je:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Budući je u povratnoj vezi signal koji dobijamo diferenciranjem vremena trajanja impulsa na enkoderu s mikrokontrolerom, mjerni signal je uslijed nesavršenosti izvedbe optičkog diska u enkoderu prilično opterećen šumom. To predstavlja problem budući da D djelovanje s takvim mjernim signalom može djelovati destabilizirajuće na sustav, stoga se najčešće to pokušava izbjeći isključujući ga u paralelnoj strukturi odnosno postavljanjem  $K_d=0$ . U tom slučaju naš regulator postaje PI strukture što će malo usporiti brzinu odziva sustava, ali će zato stabilnost sustava biti bolja. Kako na izlazu regulatora mora biti vrijednost 10-bitnog PWM kanala u iznosu od 0-1023, potrebno je postaviti gornji limit te algoritam koji će prepoznati negativni izlaz i komplementirati izlaznu liniju kontrolera koja upravlja smjerom na energetskom sklopu.

## 4.2. PID regulator položaja



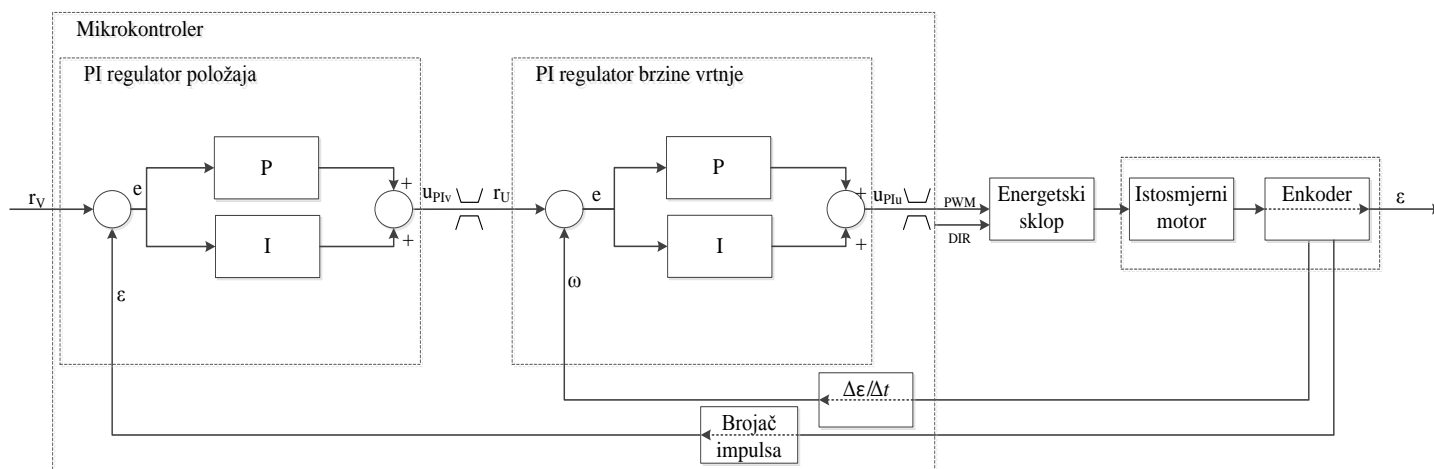
Slika 22. Struktura PID regulatora položaja

Regulator položaja također je izveden klasičnom paralelnom(neinteraktivnom)[4] PID strukturom koja se odvija unutar programa mikrokontrolera. Algoritam ove strukture regulatora je:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

U povratnoj vezi regulacije položaja imamo mjerenje s dva enkoderska kanala čiji su signali fazno pomaknuti za  $90^\circ$ . Mikrokontroler u prekidnoj rutini inkrementira odnosno dekrementira vrijednosti položaja na temelju algoritmom utvrđenog smjera vrtnje motora. Algoritam se odvija u prekidnoj rutini iz razloga što je izvršavanje tog segmenta programskog koda najvišeg prioriteta kako bi se izbjeglo eventualno gubljenje impulsa i samim time krivi izračun položaja. I u ovom slučaju na izlazu regulatora mora biti vrijednost 10-bitnog PWM kanala u iznosu od 0-1023, kao i prethodno, potrebno je postaviti gornji limit te algoritam za upravljanjem smjera u slučaju negativne regulacijske veličine.

#### 4.3. Kaskadna PI struktura regulatora položaja unutarnjom PI petljom regulacije brzine vrtnje



Slika 23. Struktura kaskadne regulacije položaja

Na slici je prikazana blok-shema kaskadne strukture regulacije položaja vratila istosmjernog motora. Vidljivo je da se sastoji iz unutarnje regulacijske petlje koja regulira brzinu motora, te vanjske petlje koja regulira njegov položaj. U ovakvoj regulacijskoj strukturi vrlo je važno shvatiti da unutarnja petlja ima velik značaj u stabilnosti sustava, te je bitno da regulator brzine bude optimalno ugođen. Također, veliki značaj ima brzina odziva unutarnje petlje za koju se preporuča da bude barem 3 do 5 puta brža od vanjske regulacijske petlje. Kad je ovakav regulator implementiran u mikrokontroler kao u našem slučaju, ovaj uvjet je jednostavno postići strukturom programa za regulaciju. U navedenom primjeru regulatora, pojavljuje se problem gdje za mjerenje položaja i brzine imamo isti senzor čija dinamika ne može istovremeno adekvatno zadovoljavati oba zahtjeva na dinamiku mjerenja pojedinih regulacijskih petlji. Eventualno rješenje ovoga problema je moguće u kasnijoj izvedbi makete gdje će se koristiti motori s reduktorom. U tom slučaju bilo bi poželjno postaviti senzor brzine vrtnje na vratilo motora, a senzor položaja na izlazno vratilo reduktora. Tako bismo izbjegli navedene probleme kao i problem modeliranja zazora reduktora koji bi nam uvodio transportno kašnjenje svojim vremenom mrtvog hoda. Kao i prethodno, postavljen je limit na izlazu regulatora brzine kako ne bismo premašili maksimalnu vrijednost 10-bitnog PWM-a, međutim jednako tako postoji limit na izlazu regulatora položaja (referenca brzine) koji je postavljen na maksimalni broj okretaja motora iz podatkovne tablice motora kako ne bismo premašivali tu vrijednost i nepotrebno nabijali vrijednost intergratoru u regulatoru brzine.



## 5. Program u mikrokontroleru

Glavni upravljački dio navedenog servosustava makete je mikrokontrolerska jedinica. Mikrokontroler je zadužen za sljedeće zadatke:

- mjerenje pozicije
- mjerenje brzine vremenskom diskretizacijom
- izvršavanje regulacijske petlje
- postavljanje signala koji određuju brzinu vrtnje, smjer te elektrodinamično kočenje
- komunikaciju s računalom

Imajući u vidu navedene zadatke potrebno je na taj način strukturirati program u mikrokontroleru. Program za mikrokontroler napisan je u okruženju BASCOM AVR, koji je prilično sposoban, a opet dovoljno jednostavan BASIC compiler za AVR obitelj mikrokontrolera. Izlaz kompilera je .HEX file koji upisujemo u mikrokontroler pomoću ISP serijskog programatora koji se nalazi na razvojnom sustavu. Segmenti važnijih dijelova programa prikazani su u nastavku.

### 5.1. Komunikacija s računalom

Mikrokontroler s računalom komunicira putem serijske komunikacije, te se primanje naredbi izvršava u serijskoj prekidnoj (interrupt) rutini. Nakon što kontroler pročita naredbu, vraća se u glavni program u kojem se naredba s računala analizira te se poziva odgovarajući podprogram s obzirom na primljenu naredbu.

```
On Urxrc Ser_int                                     'kofiguracija serijske prekidne rutine
Enable Urxrc
```

```
'serijska prekidna rutina
Ser_int:

Prev_cmd = Cmd                                     'spremanje prethodne naredbe
Input Cmd Noecho                                   'citanje naredbe sa serijske veze
Cmd_size = Split(cmd , Cmd_ar(1) , " ")           'segmentiranje primljene naredbe

Return
```

## 5.2. Mjerenje pozicije odnosno brzine

Kanali enkodera su spojeni na pinove mikrokontrolera koji su prethodno definirani kao ulazni. Jedan od kanala je spojen na pin kontrolera na kojemu se nalazi hardverski interrupt kako bismo mogli trenutno očitati stanje svaki put kad se dogodi promjena bez obzira u kojem dijelu programa prethodno bili. Hardverska prekidna rutina služi brojanju impulsa na enkoderu, zbrajanju impulsa ako je jedan smjer vrtnje, odnosno oduzimanju ako se radi o suprotnom smjeru vrtnje. Također, inicijaliziramo Timer2 s prescale vrijednošću dijeljenja frekvencije u iznosu 1024, što znači da će se overflow 8-bitnog Timera2 dogoditi svakih 32,768 ms. Ovaj vremenski iznos nam služi za mjerenje brzine, odnosno u tom peiodu mjerimo broj impulsa koji se dogodio na enkoderu, i sukladno tome izračunavamo broj okretaja motora.

U okvirima ispod prikaz je dijelova programa zaduženih za navedene zadaće:

```
Config Timer2 = Timer , Prescale = 1024           'konfiguracija timera
On Timer2 Tim
Stop Timer2

Config Int0 = Change                               'konfiguracija hardverskog prekida programa
Enable Int0
On Int0 Cnt
```

```
'hardverska prekidna rutina
Cnt:
  B = Pind.3                                       'kanal b enkodera
  A = Pind.2                                       'kanal a enkodera
  If A = 0 Then
    Refb = B
    Goto Skip
  End If

  If B = Refb Then
    Goto Skip
  End If

  If Refb = 0 Then                                'jedna strana
    Decr P
    Decr S
    Else                                          'druga strana
    Incr P
    Incr S
  End If
Skip:
Return

'Timer2 overflow prekidna rutina(izvršava se svakih 32.768 ms)
Tim:
  Imp = S                                         'spremi vrijednost izbrojenih impulsa
  S = 0                                           'postavi brojač impulsa za računanje brzine na 0
Return
```

U dijelu programa gdje želimo izračunati brzinu u broju okretaja po minuti, samo izvršimo dolje navedeni dio koda:

```
'računanje broja okretaja
N = Imp * 0.1525878907
N = N * 60
Rpm = Round(n)

'broj okretaja u sekundi
'broj okretaja u minuti
'zaokružavanje na cijelobrojnu vrijednost
```

### 5.3. Načelo regulacije

U okviru ispod vidljiv je pseudokod prema kojem su strukturirane PID regulacijske petlje:

```
prethodni_error = 0
integral = 0
start:
    error = postavna_veličina - mjerena_veličina
    integral = integral + error*dt
    derivacija = (error - prethodni_error)/dt
    izlazna_veličina = Kp*error + Ki*integral + Kd*derivacija
    prethodni_error = error
    wait(dt)
    goto start
```

U ovom prikazu vidljiv je algoritam PID regulatora slijedom naredbi gdje su prvo u programu postavljene početne vrijednosti na nulu, te se ulazi u regulacijsku petlju. Error veličina je izračunata oduzimanjem mjerene veličine od postavne veličine(reference). Zatim se računaju vrijednosti integralnog i derivacijskog djelovanja te se formira izlazna veličina kao zbroj proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog djelovanja pomnožene pripadajućim pojačanjima. Zatim se čeka vrijeme  $dt$  u kojem mikrokontroler dohvaća mjerne signale i eventualnu novu, izmjenjenu postavnu veličinu(referencu), te ponovno ulazi u regulacijsku petlju.

U nastavku je prikazan princip regulacije na primjeru segmenta programa mikrokontrolera zaduženog za PID regulaciju brzine vrtnje. U regulacijsku petlju su ukomponirani dijelovi za računanje broja okretaja, limitiranje vrijednosti integratora, postavljanje smjera, limitiranje PWM vrijednosti, te ispisa regulacijskih veličina serijskom vezom za kasiji prikaz vremenskih dijagrama odziva na računalu.

```

Portd.6 = 1                                     'brake=off
Portd.7 = 1                                     'početna definicija smjera

Do

N = Imp * 0.1525878907
N = N * 60
Rpm = Round(n)                                'izračun broja okretaja u minuti
'regulacija
E = Spd - N
Edt = E * Dt
Integ = Integ + Edt
Integ = Ki * Integ
Deriv = E - Ep
Deriv = Deriv / Dt
Deriv = Kd * Deriv
Ep = E
'anti-windup
Select Case Integ
Case Is > 1000:
    Integ = 1000
Case Is < -1000:
    Integ = -1000
End Select

Reg = Kp * E
Reg = Reg + Integ
Reg = Reg + Deriv

'postavljanje smjera
If Reg < 0 Then
    Reg = Abs(reg)
    Portd.7 = 0
Else
    Portd.7 = 1
End If

'limit PWM
If Reg > 1023 Then
    Reg = 1023
End If

Pwm1 = Reg
Pwmla = Pwm1                                'postavljanje upravljačkog signala

'ispis
E = Round(e)
Ei = Int(e)
Regi = Round(regi)
Regii = Int(regi)
'formiranje ispisanog stringa
Ispis = Str(ei) + "," + Str(regii) + "," + Str(pwm1) + "," + Str(rpm) + "," + Str(rpm) + "/"
Print Ispis

Waitms Dt

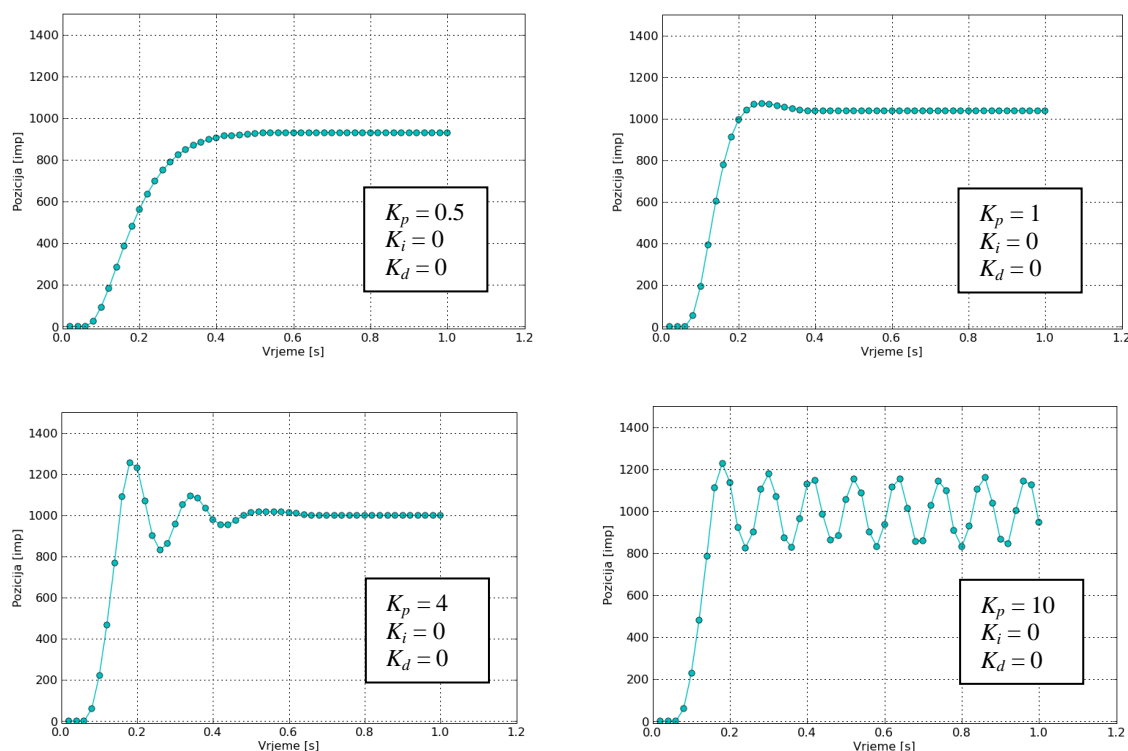
Loop

```

## 6. Rezultati eksperimenata

Budući je algoritam regulacije paralelne(neinteraktivne) strukture, moguće je postavljanjem pojačanja pojedinog djelovanja regulatora na nulu isključiti isti iz regulacijske petlje.

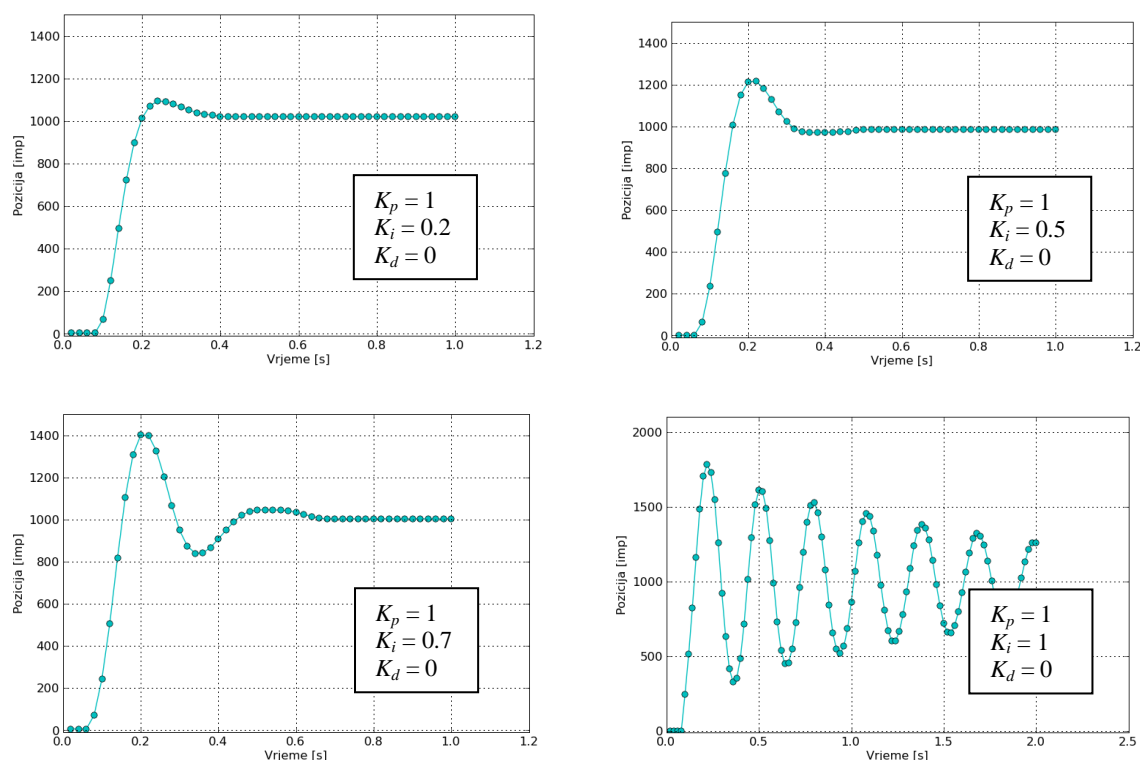
### 6.1. Pozicioniranje – Pregulator



Slika 24. Odzivi P regulatora

Na slici iznad vidljivi su odzivi P regulatora za različite iznose proporcionalnog pojačanja  $K_p$ . Za  $K_p=0.5$  odziv sustava ne postiže vodeću veličinu te se pojavljuje trajno regulacijsko odstupanje. Povećavanjem na  $K_p$  regulacijsko odstupanje se smanjuje, ubrzava se odziv sustava, ali također možemo ustanoviti da se pojavljuje nadvišenje. Daljnjim povećavanjem  $K_p$  dolazi do pojave oscilacija i destabilizacije sustava.

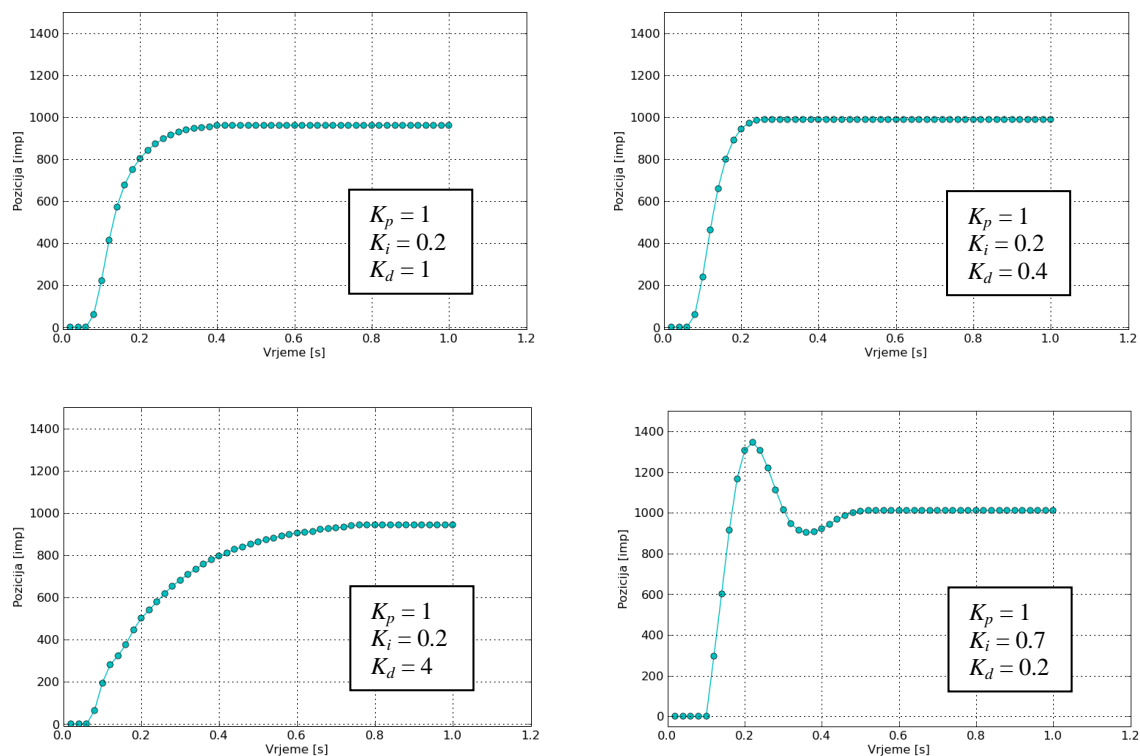
## 6.2. Pozicioniranje – PI regulator



Slika 25. Odzivi PI regulatora

Na Slici 25 vidljivo je ponašanje sustava s PI regulatorom. Za pojačanje  $K_p=1$  povećavano je pojačanje  $K_i$ . U slučaju  $K_i = 0.2$  regulacijsko odstupanje se smanjuje no još uvijek je prisutno zbog trenja unuta elektromotora. Daljnjim povećanjem  $K_i$  preko  $K_i = 0.5$  regulacijsko odstupanje isčezava, ali se unosi nestabilnost u sustav zbog sve jačeg utjecaja nabijanja integratora. Za  $K_i = 1$  prevladava I djelovanje te sustav postaje nestabilan.

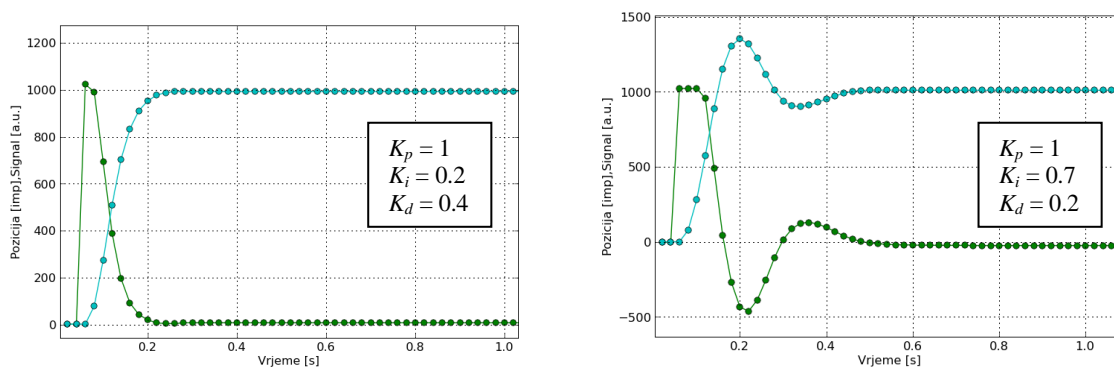
### 6.3. Pozicioniranje – PID regulator



Slika 26. Odzivi PID regulatora

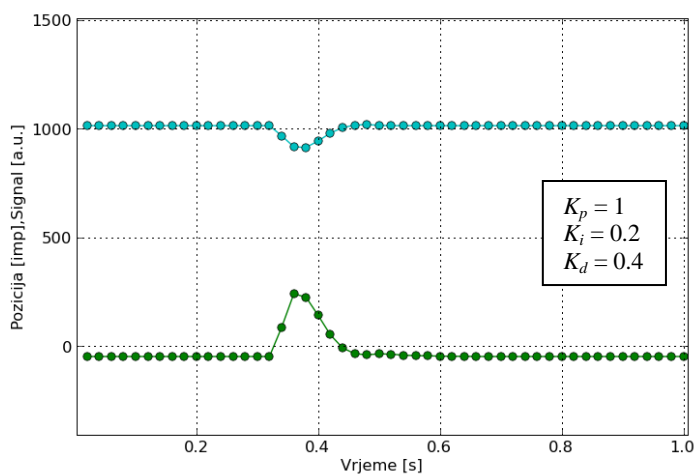
Kako bismo dobili sustav brzog odziva, bez trajnog regulacijskog odstupanja te prihvatljivog nadvišenja, uvodimo D djelovanje u regulator. Na Slici 26 prikazani su odzivi PID regulatora za različita pojačanja  $K_d$ . Možemo ustanoviti kako D djelovanje stabilizirajuće utječe na odziv sustava, te ga istovremeno usporava. Opet možemo vidjeti regulacijska odstupanja uzrokovana trenjem u ležajevima motora. Na posljétku je prikazan odziv regulatora za  $K_p=1$   $K_i=0.7$  i  $K_d=0.2$  koji ima mnogo veću brzinu odziva, ali istovremeno i povećano nadvišenje.

Za slučaj  $K_p=1$   $K_i=0.2$  i  $K_d=0.4$  prikazana je istovremeno na dijagramu odziva pozicije i upravljačka veličina koja je ograničena limitom 10-bitnog PWM-a na vrijednost 1023. Za slučaj  $K_p=1$   $K_i=0.7$  i  $K_d=0.2$ , vidljivo je da upravljačka veličina postaje negativna uslijed premašaja pozicije te se počinje kočiti elektromotor.



Slika 27. Upravljačka veličina(zeleno) i pozicija(plavo)

#### 6.4. Kompenzacija poremećaja



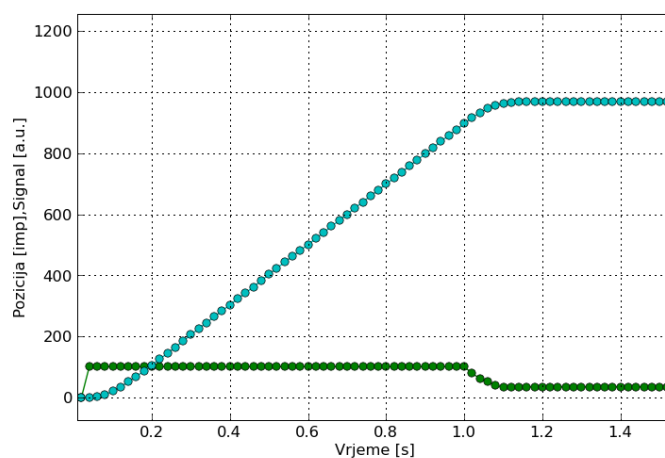
Slika 28. Kompenzacija poremećaja

Na Slici 28. Vidljiv je utjecaj poremećaja pozicije te odziv upravljačke veličine. Na negativni skok pozicije upravljačka veličina raste kako bi kompenzirala poremećaj i smanjila signal pogreške na nulu.



## 6.5. Utjecaj ograničenja upravljačke veličine

Na slici u nastavku prikazan je odziv sustava s ograničenjem upravljačke veličine. Uočljivo je da nakon saturacije upravljačke veličine na PWM=100 pozicija raste jednoliko uslijed konstantne kutne brzine motora. Jednako tako, pojavljuje se trajno regulacijsko odstupanje kao posljedica trenja u ležajevima motora koje vrlo mala regulacijska veličina nije u stanju kompenzirati.



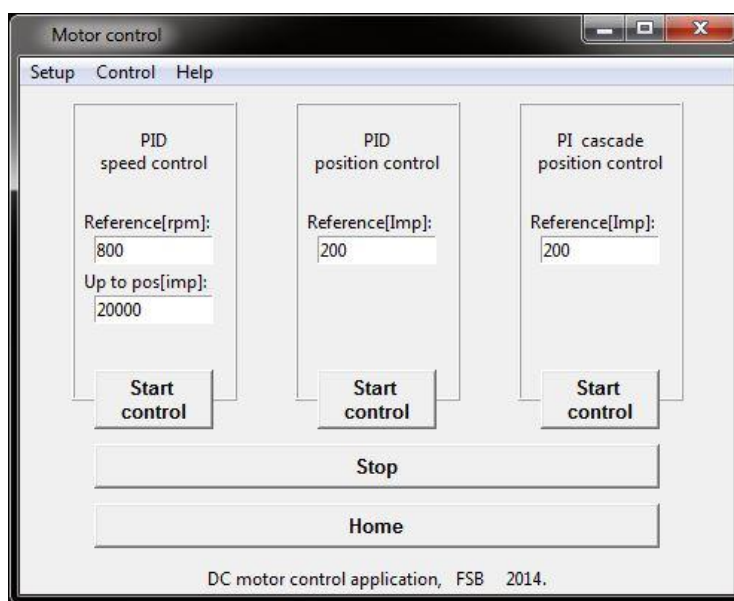
Slika 29. Odziv s ograničenjem upravljačke veličine

## 7. Program na računalu

Upravljanje eksperimentalnim postavom makete se izvršava putem programskog koda u računalu. Program je napisan korištenjem programskog jezika Python 2.7 i razvojnog okruženja Pyscripter. Navedeni programski jezik odabran je zbog svoje objektno strukture koja omogućava jednostavan pristup programiranju sučelja i podržava velik broj vanjskih modula i paketa za serijsku komunikaciju i ostale radnje potrebne za upravljanje strojem i vizualizaciju stanja servosustava.

### 7.1. Grafičko sučelje

U nastavku je opisano grafičko sučelje za upravljanje eksperimentalnim postavom makete te sve funkcije koje program sadrži.

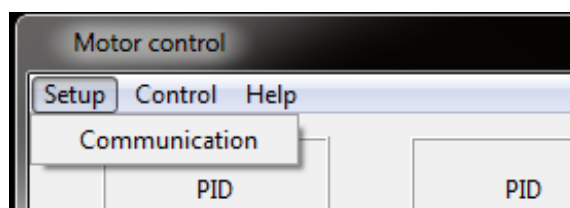


Slika 30. Izgled glavnog prozora aplikacije

Na slici iznad prikazan je izgled glavnog prozora aplikacije na kojem su vidljive njene glavne funkcije. Prozor se sastoji od alatne trake s izbornicima 'Setup', 'Control' i 'Help', te 5 različitih tipkala za pokretanje određenih funkcija. Tipkalo 'Home' namijenjeno je pokretanju funkcije koja će obavijstiti mikrokontroler da inicijalizira početni položaj makete dodirom kranjeg prekidača na konstrukciji makete. Tipkalo 'Stop' pokreće funkciju koja šalje mikrokontroleru naredbu za zaustavljanje makete, neovisno u kojem modu regulacije se trenutno maketa nalazi. Tipkala 'Start control' pokreću željeni mod regulacije za koji su prethodno unijete

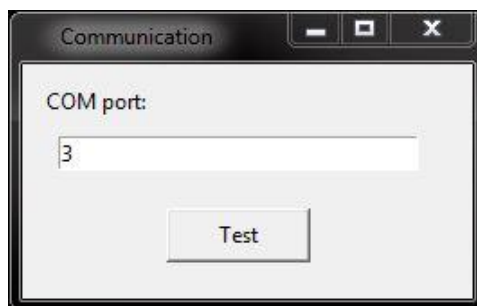
vrijednosti vodećih veličina. Prilikom pokretanja regulacije brzine, potrebno je također unijeti parametar koji određuje do koje pozicije, izraženo u impulsima enkodera, se želi regulirati motor postavljenom brzinom. Vodeće veličine za regulaciju pozicije izražene su u impulsima na enkoderu, kojih kako je opisano u poglavlju 2.2.2 postoji 200 unutar jednog okretaja.

Pritiskom na 'Setup' izbornik alatne trake otvara nam se funkcija za pokretanje prozora 'Communication' koju prilikom pokretanja aplikacije trebamo izvršiti kako bismo ustanovili na kojem portu serijske veze je priključena naša maketa.

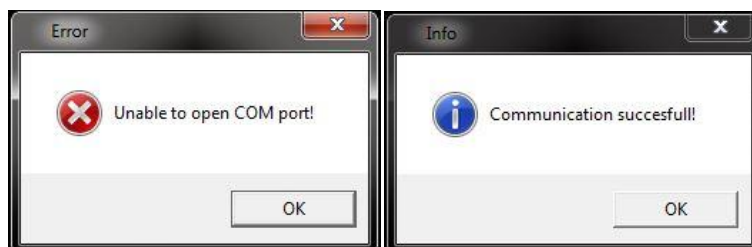


Slika 31. Izbornik 'Setup' alatne trake

U prozoru 'Communication' potrebno je unijeti broj serijskog porta, te pritisnuti na tipkalo 'Test', kojim aplikacija inicijalizira serijsku komunikaciju, zapamti broj serijskog porta te ga testira i obavijesti korisnika ispisujući poruke o stanju serijske veze.

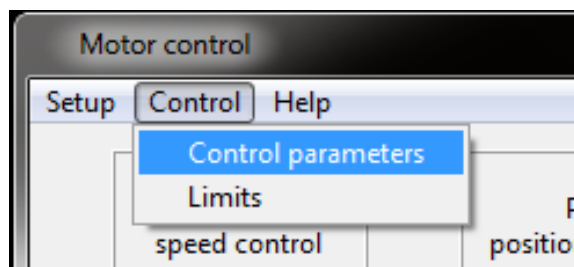


Slika 32. Prozor 'Communitation'



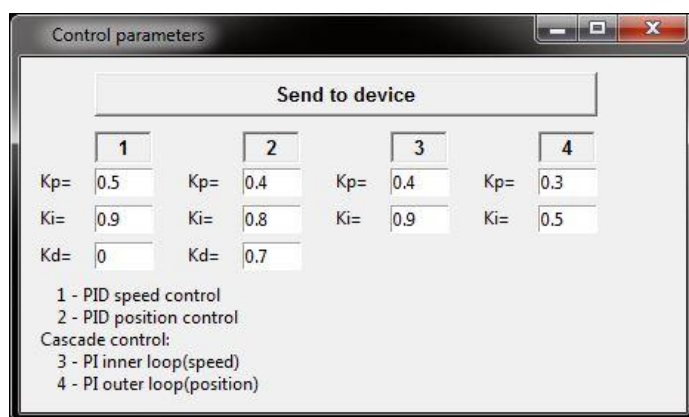
Slika 33. Poruke o stanju serijske veze

Pritiskom na 'Control' izbornik alatne trake otvara nam se fukcija za pokretanje prozora 'Control parameters', odnosno 'Limits' koje služe upisivanju pojačanja za pojedine regulatore, odnosno postavljanje limita na izlaze pojedinih regulatora te dt vrijeme regulacije.

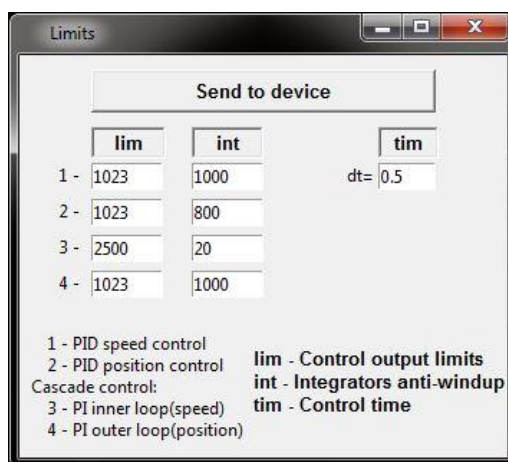


Slika 34. Izbornik 'Control' alatne trake

U nastavku su prikazani prozori 'Control parameters' i 'Limits' za postavljanje regulacijskih parametara i limita. Vrijednosti se nakon upisa u polja za unos, šalju serijskom vezom u zapakiranoj poruci prema mikrokontroleru pritiskom na tipkalo 'Send to device'.

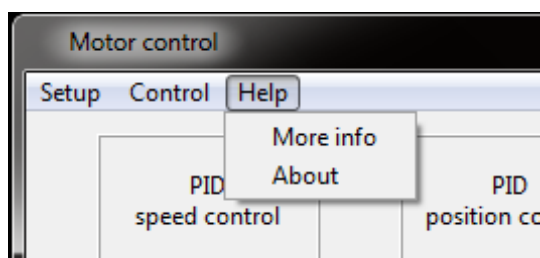


Slika 35. Prozor 'Control parameters'



Slika 36. Prozor 'Limits'

U alatnoj traci, također je postavljen izbornik 'Help' u kome je moguće dobiti više informacija o radu aplikacije, kako bi korisnik bez prevelike popratne dokumentacije mogao pokretati maketu.



**Slika 37.** Opcije izbornika 'Help' alatne trake

## 8. ZAKLJUČAK

Projektiranjem ove makete, stečena su dodatna znanja i iskustva potrebna za rješavanje raznih problema koji se mogu pojaviti prilikom projektiranja, odnosno programiranja ovakvog servosustava. Pokazana je praktična implementacija algoritma PID regulatora u mikrokontroler i prikazano je kako različiti parametri i strukture regulatora utječu na ponašanje sustava. Iz rada je također vidljivo kako teorija sinteze PID regulatora vrijedi i u primjeni na realnom procesu, međutim uz bitnu razliku od simulacija gdje se u stvarnosti javljaju mnogi šumovi i mehaničke smetnje koje treba biti sposoban ukloniti ili zaobići. Razvijen je konstrukcijski model translatora koji može imati mnoge različite primjene u budućnosti. Može služiti kao edukacijski model u nastavi, ali ga se može iskoristiti i u mnogim praktičnim primjenama. Studenti na njemu mogu izvršavati niz eksperimenata s ugađanjem regulatora i posmatranjem odziva iz dijagrama na računalu ili u slučaju primjenjenog „plotter“ nastavka, izravno na papiru postavljenom na podlogu stroja. Budući je servo upravljanje razvijano uz pomoć eksperimentalnog postava koji nije istovjetan konačnoj maketi sustava, postoje još mnoge mogućnosti i potrebe razrade upravljanja i regulacije na stvarnom sustavu.

## **LITERATURA**

- [1] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [2] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [3] Skalicki, Grilec: Električni strojevi i pogoni, FSB Zagreb, 2011.
- [4] Vukić, Kuljača: Automatsko upravljanje, Kigen Zagreb, 2004.
- [5] Šurina, T.: Automatska regulacija, Školska knjiga Zagreb, 1981.
- [6] J. Deur, D. Pavković: nastavni materijali iz kolegija "Elektromotorni servopogoni"
- [7] M. Crneković, D. Pavković: nastavni materijali iz kolegija "Mikroprocesorsko upravljanje"
- [8] D. Pavković: nastavni materijali iz kolegija "Senzori"

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija